Modul 2

Chemie und Physik der Atmosphäre

Begleittext für Lehrkräfte

Reinhard Fischer, Marion Heinecke-Herzog,
Frank Siemer und Ulf Baumann

Dieser Text steht zusammen mit den Texten der 10 weiteren Module des Projektes „Forschungsdialog: System Erde“ auf der CD-ROM „System Erde“ als Hypertext bzw. die Materialien als pdf-Dateien, Videos, Interaktionen, Animationen usw. über ein komfortables Navigationssystem mit Suchfunktion zur Verfügung.

Mit der CD-ROM können auch eigene Materialien erstellt werden. Außerdem kann aus der CD-ROM eine Schülerversion, die für das selbst organisierte Lernen vorgesehen ist - und keine didaktischen Informationen enthält - erstellt werden.

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

Das Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN) ist eine interdisziplinär arbeitende Forschungseinrichtung mit überregionaler, gesamtstaatlicher Aufgabenstellung. Auftrag des Instituts ist es, durch seine Forschungen die Pädagogik der Naturwissenschaften weiter zu entwickeln und zu fördern. Das IPN gliedert sich in die vier Fachabteilungen Biologie-, Chemie-, Physikdidaktik und Erziehungswissenschaften (mit Pädagogisch-Psychologischer Methodenlehre). Das IPN ist Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft. Enge Beziehungen bestehen zur Kieler Universität.

Weitere Informationen: http://www.ipn.uni-kiel.de







Forschungsdialog: System Erde

Kontakt:

Ulrike Gessner
Leibniz-Institut für die Pädagogik der
Naturwissenschaften an der Universität Kiel
Olshausenstr. 62
24098 Kiel

Tel: ++49 (0431) 880-3121
E-Mail: gessner@ipn.uni-kiel.de
http://systemerde.ipn.uni-kiel.de

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte IPN-Projekt „Forschungsdialog: System Erde" dient dem Ziel, das Verständnis des Planeten Erde zu fördern. Auf der Basis soliden Wissens soll die Beschäftigung und Auseinandersetzung mit der nachhaltigen Entwicklung der Erde angeregt werden. Die Materialien zum Thema *„System Erde"* wurden vom IPN in enger Kooperation mit Geowissenschaftlerinnen und Geowissenschaftlern sowie Lehrkräften entwickelt und anschließend im Schulunterricht erprobt und evaluiert.
Für den Unterricht in der Sekundarstufe II steht eine umfangreiche CD-ROM zur Verfügung, die u. a. Animationen, Simulationen, Informationstexte und Arbeitsblätter zu insgesamt 11 Modulen des Themas System Erde enthält. Der vorliegende Text ist Teil dieser CD-ROM, die beim IPN erhältlich ist.
Für den Unterricht in der Grundschule wurde ein Sachbuch und eine beiliegende CD-ROM mit Computerspielen entwickelt. Unterrichtsmaterialien für die Hand der Lehrkräfte sind im Internet erhältlich (http://Systemerde.ipn.uni-kiel.de).

Auf verschiedenen Seiten befinden sich Verweise (Links) auf Internet-Adressen. Haftungshinweis: Trotz sorgfältiger inhaltlicher Kontrolle wird die Haftung für die Inhalte der externen Seiten ausgeschlossen. Für den Inhalt dieser externen Seiten sind ausschließlich deren Betreiber verantwortlich. Sollten Sie bei dem angegebenen Inhalt des Anbieters dieser Seite auf kostenpflichtige, illegale oder anstößige Inhalte treffen, so bedauern wir dies ausdrücklich und bitten Sie, uns umgehend per E-Mail davon in Kenntnis zu setzen, damit beim Nachdruck der Verweis gelöscht wird.

© 2005
Alle Rechte beim
Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)
Olshausenstraße 62, D-24098 Kiel.

Autoren dieses Moduls:
Dr. Reinhard Fischer, Marion Heinecke-Herzog,
Dr. Frank Siemer, Ulf Baumann
Geowissenschaftliche Beratung:
Dieter Kasang (MPI, Hamburger Bildungsserver)
Multimediaumsetzung, Grafik und Layout:
CD-ROM, Rahmenlayout, Grafiken: MMCD GmbH
interactive in science (Düsseldorf)
Texte: Päivi Taskinen (IPN)
Herausgeber:
Prof. Dr. Horst Bayrhuber, Prof. Dr. Manfred Euler,
Dr. Sylke Hlawatsch

Inhaltsverzeichnis

2 Sachinformationen 4

2.3 Physik und Chemie der Atmosphäre..6
2.3.1 Aufbau der heutigen Atmosphäre 8
2.3.2 Chemie der heutigen Atmosphäre 9
2.4 Strahlungshaushalt des Systems Erde 10
2.4.1 Strahlungshaushalt der Erde 11
2.4.2 Der Treibhauseffekt 14

3 Didaktische Informationen 16

2.3 Lernziele..16
2.4 Hinweise zu den Lernvoraussetzungen 17
2.5 Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen 17
2.6 Erläuterungen und Nutzungshinweise zu den Materialien......................17

4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf..18

5 Literatur 19

6 Unterrichtsmaterialien...20

Anhang:

Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Wärmehaushalt

Baustein 2: Temperaturstrahlung

Baustein 3: Strahlungsabsorption

Baustein 4: Modelltreibhäuser

1 Allgemeine Zielsetzung und Begründung

Das vorliegende Modul dient zur Einführung in den Problemkreis Atmosphäre und Treibhauseffekt. Es ermöglicht einen experimentellen Zugang im Unterricht, wofür Arbeitsbögen mit Lösungen beigefügt sind.

Bei der Behandlung des Treibhauseffektes wird zwischen dem natürlichen Effekt, der menschliches Leben auf der Erde erst ermöglicht, und dem durch die Industrialisierung bedingten, anthropogenen Treibhauseffekt unterschieden.

Die vorliegende Unterrichtseinheit ist durch eine deutlich physikalisch geprägte Sichtweise auf den Themenkreis Treibhauseffekt gekennzeichnet. Obwohl verschiedene Stoffkreisläufe eng mit dem Treibhauseffekt verknüpft sind - wie z. B. der Kohlenstoffkreislauf -, werden diese im vorliegenden Material nur punktuell erwähnt Stoffkreisläufe werden in gesonderten Modulen behandelt (s. Modul „Kohlenstoffkreislauf" und „Gesteinskreislauf - Gesteine als Dokumente der Erdgeschichte"). Auf eine systematische Einführung der benötigten Konzepte der Wärmelehre zur Bearbeitung des Themenkreises Treibhauseffekt wird verzichtet (s. Oberstufenbücher zur Physik).

Im Themenkreis Treibhauseffekt soll zudem der Bezug zur aktuellen Klimadiskussion hergestellt werden. Grundlage für die heute zunehmend erforderlichen politischen Entscheidungen zum Klimaschutz sind z. B. (numerische) Klima-Prognose-Modelle, die Daten und Ergebnisse verschiedener naturwissenschaftlicher Teil-Disziplinen verwenden. Ergänzende Erläuterungen dazu sind im Modul „Klimasystem und Klimageschichte" (Modul 10, Baustein 1, Baustein 2 und Baustein 7) zu finden.

2 Sachinformationen

Der Treibhauseffekt - das Gegenstrahlvermögen der Erdatmosphäre und die daraus resultierende Erwärmung der untersten Luftschichten ist nicht ein allein vom Menschen erzeugtes Phänomen, sondern das Resultat des Zusammenspiels einer Vielzahl von atmosphärischen Kenngrößen (Parametern) und Klimaelementen (s. Abb. 1).

Kohlenstoffdioxid spielt eine wichtige Rolle im natürlichen Treibhauseffekt und hat auch eine entscheidende Rolle für den anthropogenen Einfluss auf das Klima. Durch seine industriellen Aktivitäten nimmt der Mensch Einfluss auf die Entwicklung des Treibhauseffektes (anthropogener Anteil) und somit auf die Veränderung des Erdklimas (s. Abb. 2 und 3).

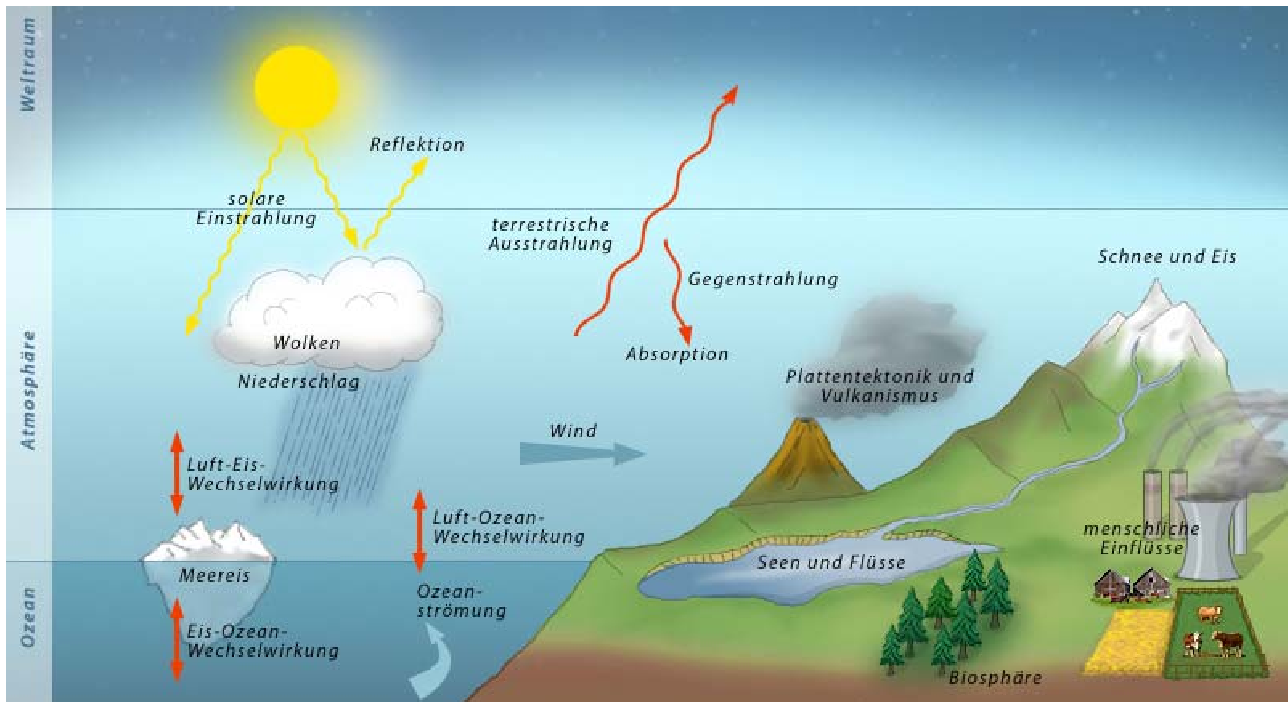


Abbildung 1: Das Klimasystem. Schematisierte Faktoren des natürlichen Treibhauseffektes sind die Einstrahlung der Sonne, die Rückstrahlung der Erdoberfläche und die Gegenstrahlung der unteren Atmosphäre (Wolken, CO_2).

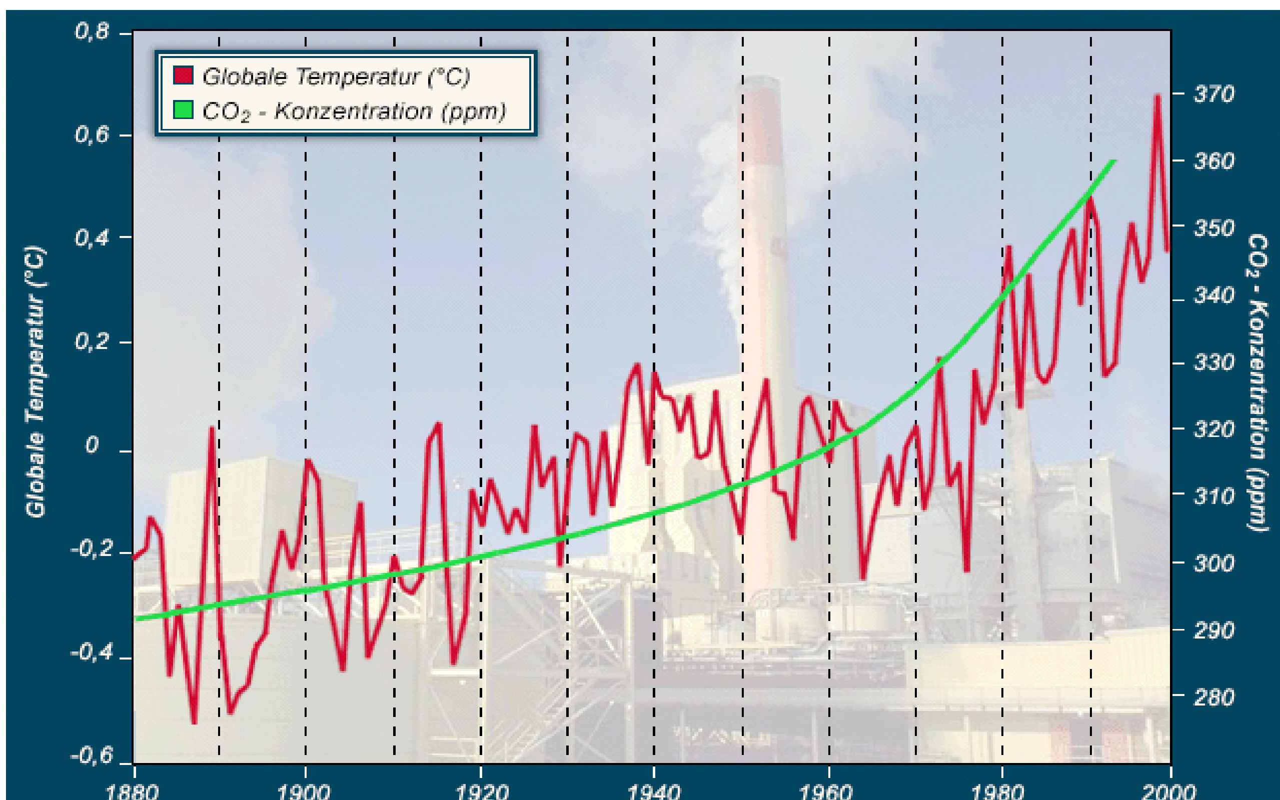


Abbildung 2: Ausstoß von Industrieabgasen (Bildhintergrund), die auch Kohlenstoffdioxid (CO_2) enthalten, in die Erdatmosphäre. Die Zunahme der globalen Temperatur (rote Kurve) in den letzten 120 Jahren geht einher mit dem Anstieg des atmosphärischen CO_2 (grüne Kurve).

Kohlenstoffdioxid-konzentration der Atmosphäre —+→ Treibhauseffekt

a) Je höher die Kohlenstoffdioxidkonzentration, umso stärker der Treibhauseffekt.

b) Je niedriger die Kohlenstoffdioxidkonzentration, umso schwächer der Treibhauseffekt.

Abbildung 3: Schematisierte Darstellung des Zusammenhangs zwischen dem CO2-Gehalt der Atmosphäre und dem Treibhauseffekt.

Die Sonnenstrahlung sowie die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Atmosphäre steuern die Dynamik der Gashülle unseres Planeten Erde. Um die Dynamik und das Zusammenspiel der atmosphärischen Kenngrößen und Klimaelemente – und insbesondere den Treibhauseffekt – besser verstehen zu können (s. Abb. 4), bereitet dieses Modul die grundlegenden physikalischen und chemischen Prozesse der Atmosphäre in anschaulicher Weise auf.



Abbildung 4: Sonnenstrahlung (von oben), reflektierende Meeresoberfläche (unten) und gegenstrahlende Wolkenschicht in der Erdatmosphäre.

2.3 Physik und Chemie der Atmosphäre

Mit der Entwicklung der Sonne von einem jungen zu einem erwachsenen Stern begannen sich Staub und Gase des sonnennahen solaren Nebels durch Schwerkraft zu Planeten zu verdichteten (s. Abb. 5).

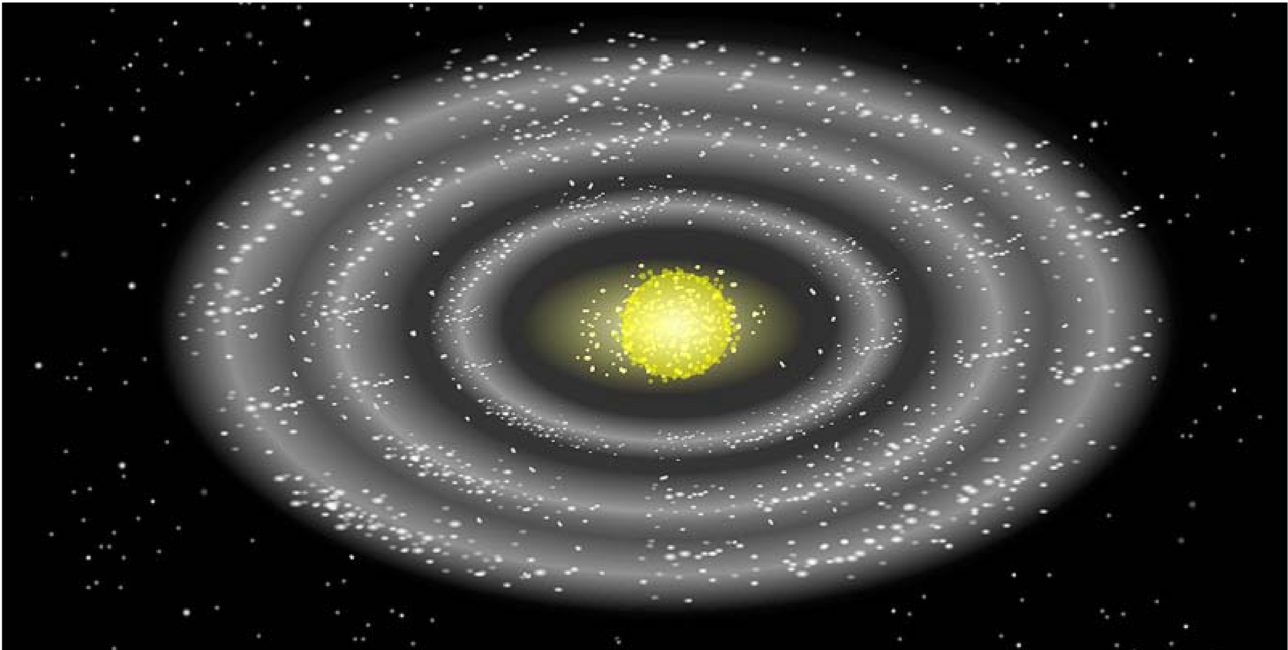


Abbildung 5: Verdichtung des solaren Nebels der Sonne zu Planeten, Monden, Meteoriten, Kometen und anderen astronomischen Körpern.

Weite Teile unseres Sonnensystems waren und sind sauerstofffrei. Dies galt auch für die frühe Erde. Im Laufe der Entwicklung der Erde hat sich deren frühe Gashülle zu einer Atmosphäre entwickelt, die vorwiegend Stickstoff, Sauerstoff und Wasserdampf enthält (s. Abb. 6 und Modul „Entstehung und Entwicklung des Lebens“ Abschnitt „Wechselwirkungen zwischen den Sphären“).

	Alter	Zusammensetzung
heutige (fünfte) Atmosphäre	1,5 Mrd. Jahre bis heute	Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf, Edelgase
vierte Atmosphäre	ca. 2,0 bis 3,0 Mrd. Jahre	Stickstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid, Sauerstoff
dritte Atmosphäre	ca. 3,5 bis 4,0 Mrd. Jahre	Stickstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid, Edelgase
zweite Atmosphäre	ca. 4,0 bis 4,5 Mrd. Jahre	Wasserdampf, Kohlendioxid, Wasserstoffsulfid, Stickstoff
primordiale (erste) Atmosphäre	ca. 4,5 bis 5,0 Mrd. Jahre	Methan, Ammoniak, Wasserdampf, Wasserstoff, Edelgase
Gashülle der erkaltenden Erde	ca. 5,0 Mrd. Jahre	Kohlenstoff-Stickstoff-Verbindungen, wenig Wasser

Abbildung 6: Entwicklungsstufen der Erdatmosphäre mit den wichtigsten Bestandteilen. Der Bestandteil mit dem höchsten Volumenanteil der jeweiligen Erdatmosphäre wird in der Spalte Zusammensetzung an erster Stelle genannt.

2.3.1 Aufbau der heutigen Atmosphäre

Aus dem mittleren vertikalen Temperaturverlauf ist die Stockwerkseinteilung der Erdatmosphäre abgeleitet (s. Abb. 7). Die Erdatmosphäre wird dadurch in verschiedene Teilsysteme, die Sphären und Pausen, unterteilt. Sphären sind größere vertikale Stockwerke der Atmosphäre, die Pausen stellen eine Art Grenzschicht zwischen jeweils zwei Sphären dar. Die Atmosphäre wird weiterhin in **Homosphäre** (unterhalb 100 km Höhe; gut durchmischt) und **Heterosphäre** (oberhalb von 100 km Höhe) eingeteilt. In der Heterosphäre kommt es zu Entmischungsprozessen der Gase der Atmosphärenluft.

Während es in den untersten ca. 12 km der Atmosphäre (**Troposphäre** oder **Wetterschicht**) mit zunehmender Höhe immer kälter wird (bis ca. - 60 °C), bleibt die Temperatur oberhalb der **Tropopause** in den ersten ca. 10 Höhenkilometern der **Stratosphäre** zunächst konstant und steigt dann in den folgenden ca. 30 km sogar wieder an. Oberhalb der **Stratopause**, in der so genannten **Mesosphäre**, erfolgt dann wieder eine Abkühlung bis auf unter - 90 °C, bevor oberhalb der **Mesopause** in der äußersten Atmosphärenschicht (**Thermosphäre**) erneut eine starke Erwärmung zu verzeichnen ist. Mit zunehmender Entfernung von der Erde geht die Thermosphäre dann langsam in das Weltall über.

Etwa 85 % der Atmosphärenmasse befinden sich in der Troposphäre. In ihr spielt sich auch das gesamte Wettergeschehen ab. Die für das Leben auf der Erde sehr wichtige stratosphärische **Ozonschicht**, die schädliche ultraviolette Strahlungskomponenten des Sonnenlichts absorbiert, befindet sich in einer Höhe von ca. 20 - 45 km. Teile der Thermosphäre werden auch als **Ionosphäre** bezeichnet. Sie dient aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften als Reflexionsspiegel für Radiokontakte im Kurzwellenbereich. Infolge der Anregung kleinster Gasteilchen in der oberen Atmosphäre (z. B. Ionosphäre) durch die Sonne entsteht ein helles, farbiges Leuchten am polaren Nachthimmel (Polarlichter).

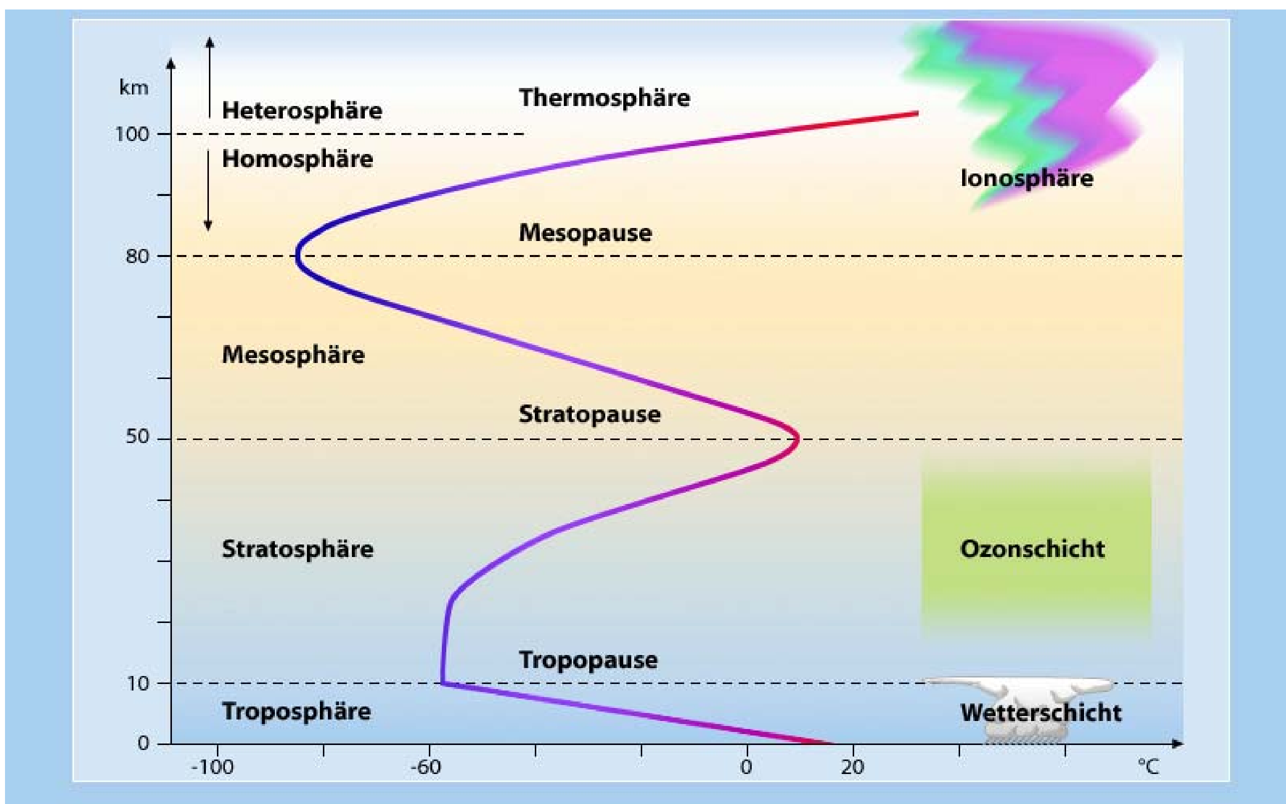


Abbildung 7: Standardatmosphäre (nach GASSMANN 1994). Schematische Darstellung der Atmosphärenstockwerke, die anhand der mittleren vertikalen Temperaturverteilung unterschieden werden.

Neben der wärmenden Sonnenstrahlung beeinflusst insbesondere die Dynamik der unteren Atmosphäre (Wetterschicht) das Klimageschehen auf der Erde (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“).

2.3.2 Chemie der heutigen Atmosphäre

Chemische Prozesse in der Atmosphäre laufen überwiegend als Reaktionen in der Gasphase unter Beteiligung von Radikalen ab. Da die Konzentration von Stoffen in großen Höhen (z. B. Stratosphäre) wegen der niedrigen Gasdichte sehr gering ist, existiert eine Fülle unterschiedlicher Verbindungen stabil nebeneinander.

Die Atmosphäre setzt sich aus verschiedenen natürlichen und anthropogenen Quellgasen (Emissionen) zusammen (s. Abb. 8). Diese unterliegen je nach Höhe in der Atmosphäre einer Umwandlung durch fotochemische Prozesse, welche direkt durch die kurzwellige Sonnenstrahlung angeregt werden oder indirekt unter Beteiligung des ebenfalls fotochemisch erzeugten Ozons ablaufen. Aus den so gebildeten Reservoiren gelangen die Gase dann aufgrund der stabilen Schichtung der Stratosphäre nur sehr langsam – z. B. durch Bindung an Tröpfchen oder Staubpartikel - als nasser bzw. trockener Niederschlag wieder zum Erdboden.

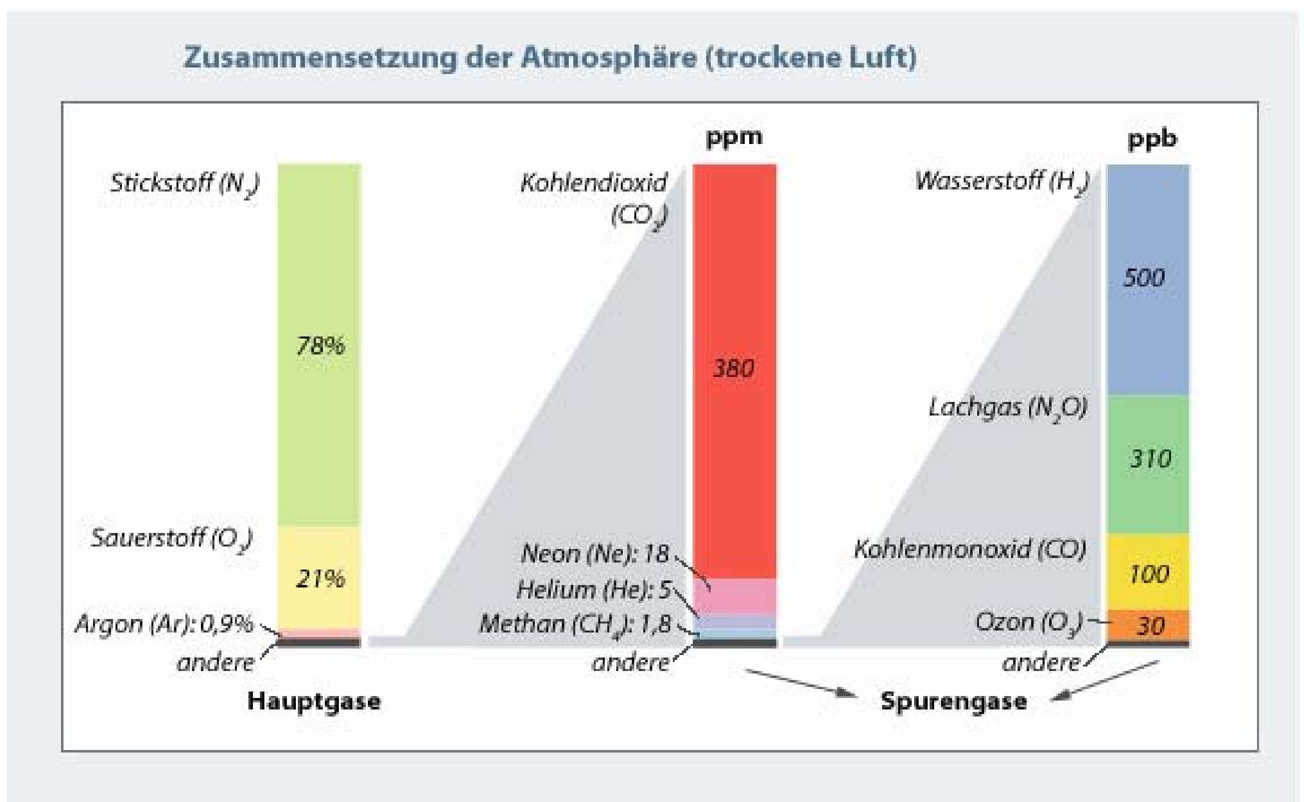


Abbildung 8: Chemische Zusammensetzung der Atmosphäre und Treibhausgase in Volumen-% bzw. in Teilchen pro Million (ppm) und Teilchen pro Milliarde (ppb).

Die gaschemischen Reaktionen und Transportvorgänge in der Atmosphäre verlaufen auf sehr unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen. Während der vertikale Gastransport in der Troposphäre infolge der turbulenten Durchmischung der Luftschichten etwa 8 bis 10 Tagen dauert, braucht die Diffusion von Gasen durch die Tropopause immerhin ca. 30 Tage. Der weitere Aufstieg von Gasen (z. B. FCKW) in größere Höhen von ca. 25 km dauert dann mehrere Monate. Da die Atmosphärendynamik der Nordhalbkugel

weitgehend von derjenigen der Südhalbkugel entkoppelt ist, dauert z. B. der Transport von nordhemisphärischen Atmosphären-Schadstoffen auf die Südhalbkugel mehrere Jahre.

2.4 Strahlungshaushalt des Systems Erde

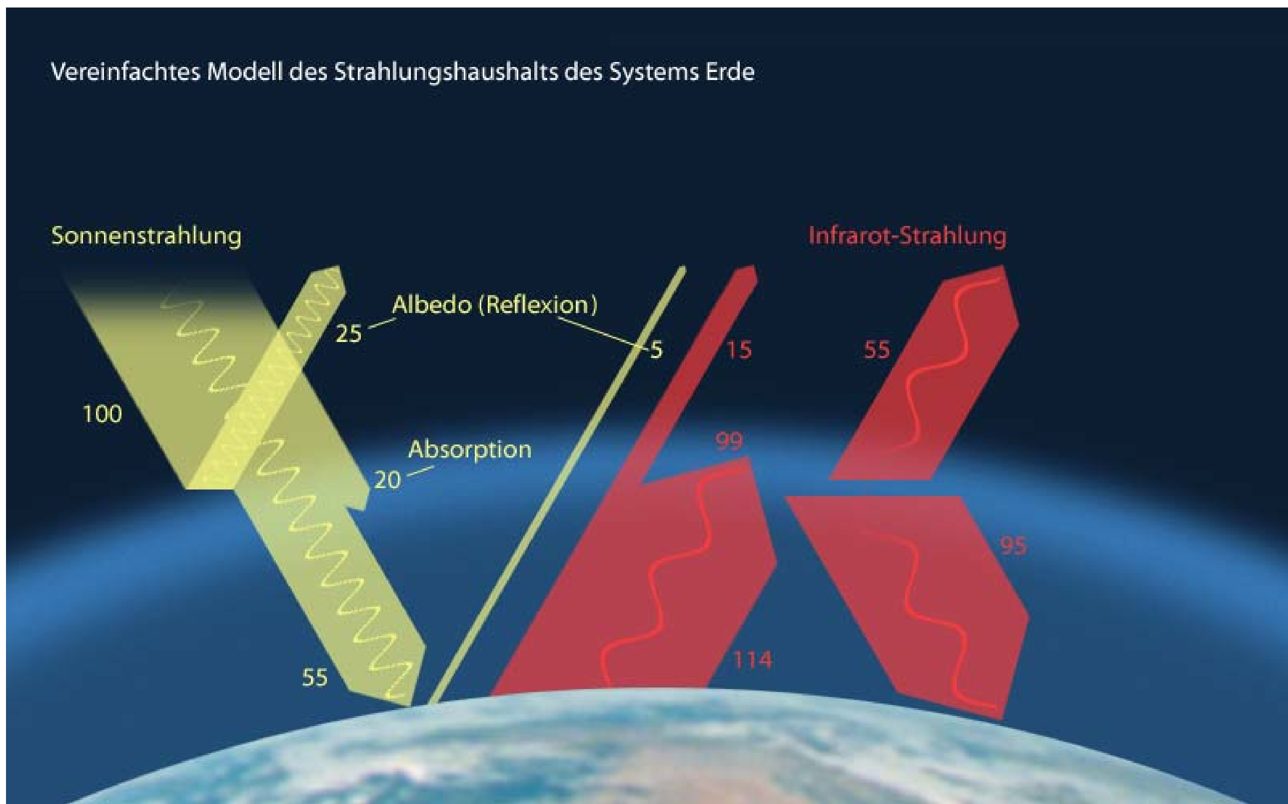


Abbildung 9: Vereinfachtes Modell des Strahlungshaushaltes der Erde bei einer angenommenen Erdmitteltemperatur von 16 °C (Zahlenangaben in %).

Der Begriff Treibhauseffekt stammt bereits aus dem Jahre 1827 von FOURIER, der die Umwandlung von „leuchtender" in „dunkle" Wärme unter einer Glasplatte beschrieb. Analog zu den Begriffen Treibhaus bzw. Gewächshaus aus dem Bereich der Gärtnerei weist der Ausdruck des Treibhauseffektes darauf hin, dass in der Atmosphäre Wärme in Form von Wärmestrahlung (Infrarotstrahlung) zurückgehalten und an der direkten Abstrahlung in den Weltraum gehindert wird (s. Abb. 1), sodass es zu einem Wärmestau in der unteren Atmosphäre kommt - genauer in der unteren Troposphäre bis etwa 5 km Höhe. Dies geschieht in der Weise, dass Spurengase, wie z. B. CO_2, Wasserdampf, Methan einen Teil der kurzwelligen Sonnenstrahlung zwar passieren lassen, die langwellige terrestrische Ausstrahlung aber absorbieren und davon wieder einen Teil zum Erdboden zurückstrahlen und den anderen Teil in den Weltraum abgeben.

Bei dieser Betrachtung wird die Bedeutung der Wärmekonvektion und des Transports latenter Wärme vernachlässigt. Wie im Gewächshaus spielt jedoch auch beim atmosphärischen Wärmetransport die Konvektion eine wichtige Rolle. Im Gewächshaus kann dieser Faktor durch variable Fensteröffnung gesteuert werden. In der Atmosphäre gelangt Wärme durch Konvektion warmer Luft und zusätzlich durch latenten Wärmetransport (z. B. Wasserdampf, der beim Kondensieren Wärme frei gibt) in höhere Schichten, erwärmt diese und veranlasst sie zu vermehrter Wärmeabstrahlung.

Das einfachste Modell des Treibhauseffekts lässt die Konvektion und die latente Wärme außer Acht und beschreibt die Nettostrahlungsbilanz in der Troposphäre lediglich anhand einer verminderten Transmission der Atmosphäre.

2.4.1 Strahlungshaushalt der Erde

Das System Erde stellt energetisch betrachtet ein offenes, stofflich ein (im Wesentlichen) geschlossenes System dar. Sie erhält Energie von der Sonne in Form von elektromagnetischer Strahlung. Die im Erdinneren durch radioaktiven Zerfall entstehende Wärme wird bei energetischen Betrachtungen zum Strahlungshaushalt vernachlässigt. Die Sonne - der „Motor des Klimas und Wetters" – strahlt infolge der in ihrem Inneren ablaufenden Kernfusionsreaktionen eine Energie von 3,9 x 10^{26} Joule pro m^2 Oberfläche ab (FRANKENBERG 1989).

Der Strahlungsstrom (I) von der Sonne wird durch das Stefan-BOLTZMANN-Gesetz beschrieben: $I = \sigma * T^4$

Dabei ist der Strahlungsstrom so groß wie das Produkt aus der Konstanten σ (Sigma) mit der 4. Potenz der absoluten Temperatur (T) der strahlenden Sonne. Die Sonne strahlt mit ihrer hohen Oberflächentemperatur von etwa 5.700 °C daher ungleich mehr Energie ab als die relativ kühle Erde mit ihrer durchschnittlichen Oberflächentemperatur von 15 °C.

Aber nicht nur die Größe des Strahlungsstroms, sondern auch die Spektralverteilung der von einem Körper ausgehenden elektromagnetischen Strahlung (s. Abb. 10) hängt von dessen Temperatur ab. Dieser Zusammenhang wird durch das **WIEN'sche Verschiebungsgesetz** beschrieben: $\lambda_{max} = n/T$.

Es bringt zum Ausdruck, dass die Wellenlängen der maximalen Energieabgabe (λ_{max}) eines Körpers indirekt proportional zur absoluten Temperatur (T) der Strahlungsquelle ist (n ist eine Konstante). Die Wellenlänge der maximalen Energieabgabe ist also umso kürzer, je höher die Oberflächentemperatur des strahlenden Körpers ist. Die Idealisierung eines Temperaturstrahlers stellt der so genannte schwarze Strahler dar, der in der Lage ist, in allen Wellenlängen Strahlung zu emittieren.

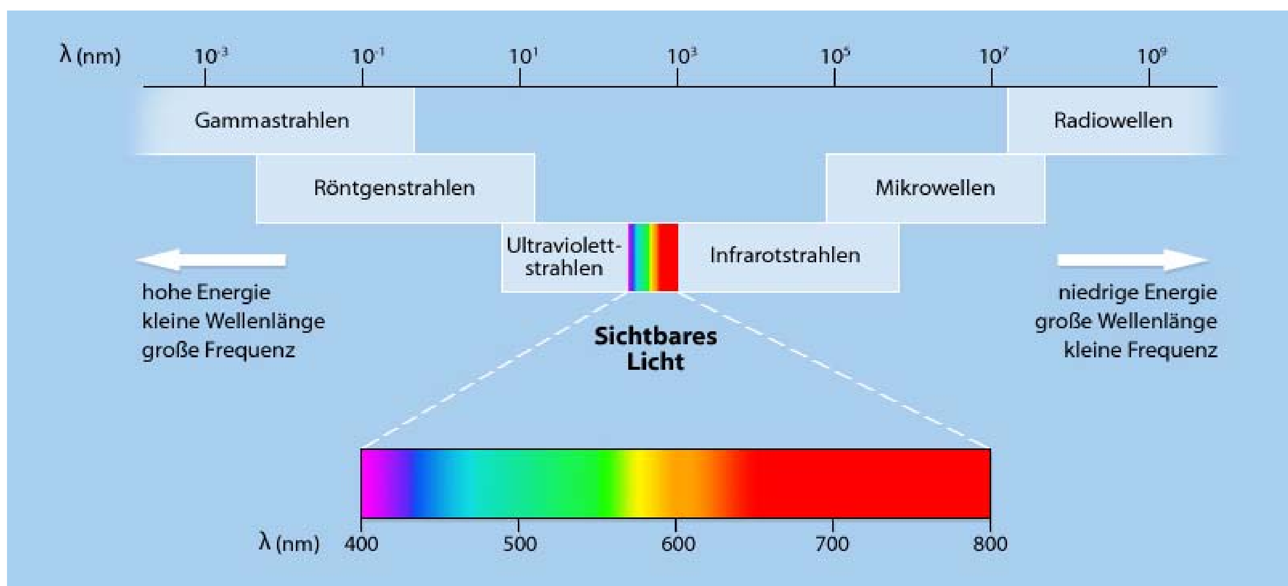


Abbildung 10: Das Spektrum elektromagnetischer Wellen (nach RIEDEL 1989).

Dementsprechend strahlt die Sonne mit ihrer hohen Oberflächentemperatur ihre Hauptenergie im kurzwelligen Bereich ab. Die Erde emittiert hingegen eher Strahlung im langwelligen Bereich, da sie mit ca.

15 °C Oberflächentemperatur relativ kühl ist. Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung der Sonne nimmt eine Bandbreite zwischen 300 - 3000 nm ein (1 nm = 10^{-9} m = 1 Milliardstel m). Etwa 10 % der solaren Strahlung liegen im UV-Bereich ($\lambda < 400$ nm), 45 % im Bereich des sichtbaren Lichts ($\lambda = 400 - 750$ nm) und 45 % im Bereich der Infrarotstrahlung (IR).

Nur 0,002 % der von der Sonne in den Weltraum abgestrahlten Energie trifft auf die Atmosphäre der Erde, wo die eingestrahlte Energie zum Teil absorbiert oder reflektiert und in den Weltraum zurückgestrahlt, remittiert, wird. Die Energie der kurzwelligen Sonneneinstrahlung beträgt oberhalb der Erdatmosphäre 1368 Watt pro Quadratmeter (Solarkonstante). Im Durchschnitt erhält davon die Atmosphäre wegen der Kugelgestalt der Erde und der sonnenabgewandten Nachtseite jeweils einer Erdhälfte aber nur ein Viertel oder 342 W/m^2 (100 %; s, Abb. 11). Ein Viertel deswegen, weil die Sonneneinstrahlung in der ursprünglichen Menge nur in Bezug auf die Querschnittsfläche der Erde πR^2 wirksam ist und nicht in Bezug auf die gesamte Erdoberfläche $4\pi R^2$.

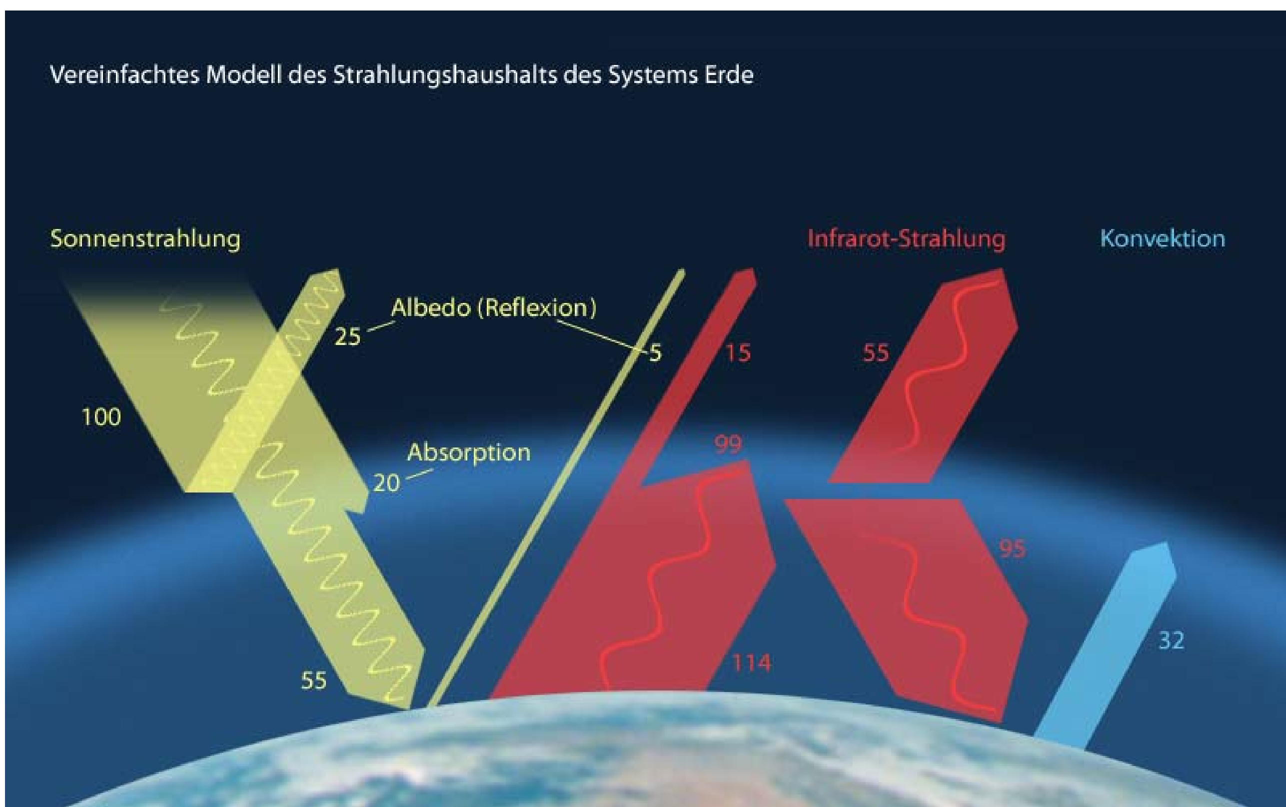


Abbildung 11: Erweitertes und realitätsnahes (aber immer noch vereinfachtes) Modell des Strahlungshaushaltes der Erde bei der heutigen Erdmitteltemperatur von 15 °C. Der Wärmetransport in der Atmosphäre ist um den Faktor des thermischen Aufstiegs erwärmter Luftmassen (Konvektion) erweitert. Zudem kann Wärme (latente Wärme) durch die Verdunstung von Wasser und anschließendem Aufstieg von Wasserdampf transportiert werden. Zahlenangaben in %.

Von dieser Strahlung stehen aber nur 240 W/m^2 oder ca. 70 % für die Erwärmung der Atmosphäre und der Erdoberfläche tatsächlich zur Verfügung, da durch die Reflexion an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre etwa 30 % bzw. 107 W/m^2, die so genannte planetare Albedo, wieder unmittelbar in den Weltraum zurückgestrahlt werden. Von den verbleibenden 240 W/m^2 werden ca. 70 W/m^2 (20 %) von Wolken, Wasserdampf, Staub und Ozon in der Atmosphäre absorbiert und erwärmen so die Atmosphäre direkt. Maximal 170 W/m^2 (ca. 50 %) werden von der Erdoberfläche absorbiert und erwärmen diese. In

analoger Weise sind die Vektoren der ausgehenden Wärmestrahlung der Erde und der Konvektion in Abbildung 11 zu interpretieren.

Das auf diese Weise erwärmte System Erde gibt die aufgenommene Energie entsprechend seiner gegenüber der Sonne deutlich geringeren Temperatur im langwelligen Infrarotbereich als Wärmestrahlung wieder ab. Die Menge der gesamten an den Weltraum zurückgestrahlten Energie an der Obergrenze der Atmosphäre, d. h. der reflektierten Solarstrahlung und der emittierten Wärmestrahlung, entspricht genau der aufgenommenen Solarenergie. Die Atmosphäre nimmt die kurzwellige Solarstrahlung von 342 W/m^2 auf und gibt die reflektierte Strahlung von 107 W/m^2 (ca. 30 %) sowie die langwellige Wärmestrahlung von 235 W/m^2 an den Weltraum zurück.

Betrachtet man die Energiebilanz der Erde, so zeigt sich, dass die Einstrahlung solarer Energie, deren Umwandlung in Wärmeenergie und die Abstrahlung terrestrischer Wärmeenergie in einem Gleichgewicht stehen (s. Abb. 11). Dieses Gleichgewicht hat sich über Jahrmillionen eingestellt. Langfristig muss die Erde so viel Energie abgeben, wie sie von der Sonne erhält, damit ihre Wärmebilanz ausgeglichen ist. Würde fortlaufend ein Teil der einstrahlenden Energie dauerhaft auf der Erde verbleiben, wäre eine stetige Erwärmung der Atmosphäre die Folge und somit menschliches Leben auf der Erde mittel- oder langfristig unmöglich.

Bei der Regulation dieses Strahlungs- bzw. Wärmegleichgewichts spielt das Reflexionsvermögen (Albedo) der Erdoberfläche eine wesentliche Rolle. So beträgt z. B. die Albedo von dunklem Gestein $<$ 5 %, von frischem Schnee etwa 85 %. Es gibt Anzeichen dafür, dass auch das Plankton der Meere einen großen Einfluss auf die Albedo der Erde besitzt, indem es die Meeresfarbe reguliert (Nisbet 1994). In diesem Zusammenhang sei auf das von Watson und Lovelock (1983) entwickelte Gänseblümchen-Weltmodell zur Erklärung der wechselseitigen Abhängigkeit der Albedo und der Entwicklung von Leben auf einem Planeten hingewiesen.

Außerhalb der Erdatmosphäre sind Satellitenmessungen des Strahlungsspektrums vorgenommen worden (s. Abb. 12). Der Kurvenzug am oberen Rand der schraffierten Fläche repräsentiert die Sonnenstrahlung außerhalb der Erdatmosphäre. Der untere Kurvenzug stellt das Spektrum des Strahlungsflusses der Sonne nach dem Durchgang durch die Atmosphäre am Erdboden dar. Offensichtlich ist durch die dazwischen liegende Atmosphäre der Strahlungsfluss in einigen Spektralbereichen geringer geworden. Der schraffierte Differenzbereich stellt somit die gemessene Strahlungsminderung durch die Atmosphäre dar, die durch die teilweise Absorption von Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Sauerstoff und Ozon gesteuert wird.

Der Spektralbereich unterhalb von 400 nm (entspricht 0,4 µm; 1 µm = 10^{-6} m) wird besonders stark von der Ozonschicht absorbiert (schädigende UV-B-Strahlung und UV-C-Strahlung). Eine Verringerung der Ozonkonzentration in der Stratosphäre hat einen erhöhten Anteil von UV-B Strahlung am Erdboden zur Folge. Auch bei Messungen des Abstrahlungsspektrums der Erde stellt man Absorptionen in der Atmosphäre fest, die wiederum durch Ozon, Kohlendioxid und Wasserdampf verursacht werden.

Während das Energiemaximum der Einstrahlung bei etwa 400 nm, also im sichtbaren Bereich, liegt, ist das Spektrum der Abstrahlung weit in den Infrarotbereich verschoben. Das theoretische Abstrahlungsmaximum eines idealisierten (schwarzen) Körpers mit einer Temperatur von 27 °C liegt bei einer Wellenlänge von ca. 1,7 µm. Die infrarote Abstrahlung im Wellenlängen-Bereich von 2,4 bis 2,8 µm ist durch die Absorption von Kohlenstoffdioxid stark reduziert und führt daher über den natürlichen Treibhauseffekt zur Erwärmung der Atmosphäre.

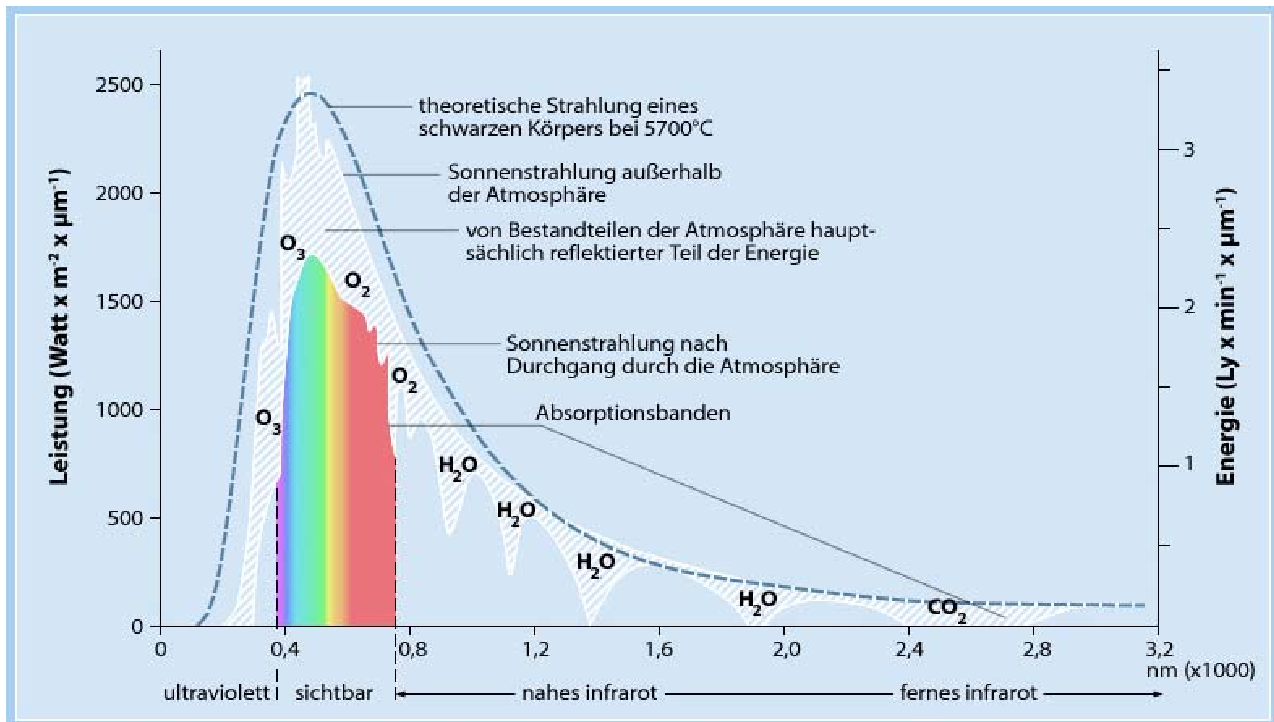


Abbildung 12: Spektrum der Energieverteilung der Sonnenstrahlung vor und nach dem Passieren der Atmosphäre (nach WEISCHET 1988). Die obere Grenze der schraffierten Fläche stellt die Sonnenstrahlung vor dem Durchgang der Atmosphäre dar, die untere Grenze dieser Fläche die Strahlung nach dem Passieren der Atmosphäre auf der Erdoberfläche. Die gestrichelte Kurve verdeutlicht die theoretische Energieverteilung für einen schwarzen Körper mit der Oberflächentemperatur der Sonne.

2.4.2 Der Treibhauseffekt

Wenn heute in den Medien vom Treibhauseffekt die Rede ist, so ist meist der anthropogene Treibhauseffekt gemeint, d. h. die Veränderung des natürlichen Treibhauseffektes durch anthropogene Einflüsse. Ohne einen natürlichen Treibhauseffekt wäre Leben auf der Erde jedoch nicht denkbar (s. Modul „Klimasystem und Klimageschichte“, Abschnitt „Elemente des Klimasystems“).

Der natürliche Treibhauseffekt

Dem natürlichen Treibhauseffekt ist es zu verdanken, dass die durchschnittliche globale Temperatur der Erdoberfläche zur Zeit ca. 15 °C statt - 18 °C beträgt (CUBASCH und KASANG 2000). Diese große Differenz von 33 °C kommt dadurch zustande, dass kurzwelliges Sonnenlicht auf seinem Weg zur Erdoberfläche die Atmosphäre zwar passieren, aber die langwellige Rückstrahlung der erwärmten Erdoberfläche die Atmosphäre größtenteils nicht auf direktem Wege verlassen kann. Atmosphärische Spurengase (die natürlichen Treibhausgase) und Wolken absorbieren die terrestrische Rückstrahlung zunächst (s. Abb. 13). Spurengase und Wolken emittieren dann einen Teil dieser Energie in den Weltraum. Zudem strahlen sie aber auch Energie in Richtung Erdoberfläche zurück. Diese wird dadurch zusätzlich aufgeheizt und emittiert wiederum langwellige Strahlung an die Atmosphäre, die diese teilweise wieder Richtung Erdoberfläche abstrahlt usw. Der auf diese Weise hervorgerufene Wärmestau bzw. die verzögerte Wärmeabgabe in der unteren Atmosphäre wird als natürlicher Treibhauseffekt bezeichnet.

Die physikalischen Mechanismen des natürlichen Treibhauseffektes werden allerdings kontrovers diskutiert. So kommt einzelnen Autor/innen zumindest der Verdienst zu, auf Funktionsmängel im Gedankenmodell des Treibhauseffektes hinzuweisen (z. B. MM-PHYSIK-UNI-WÜRZBURG).

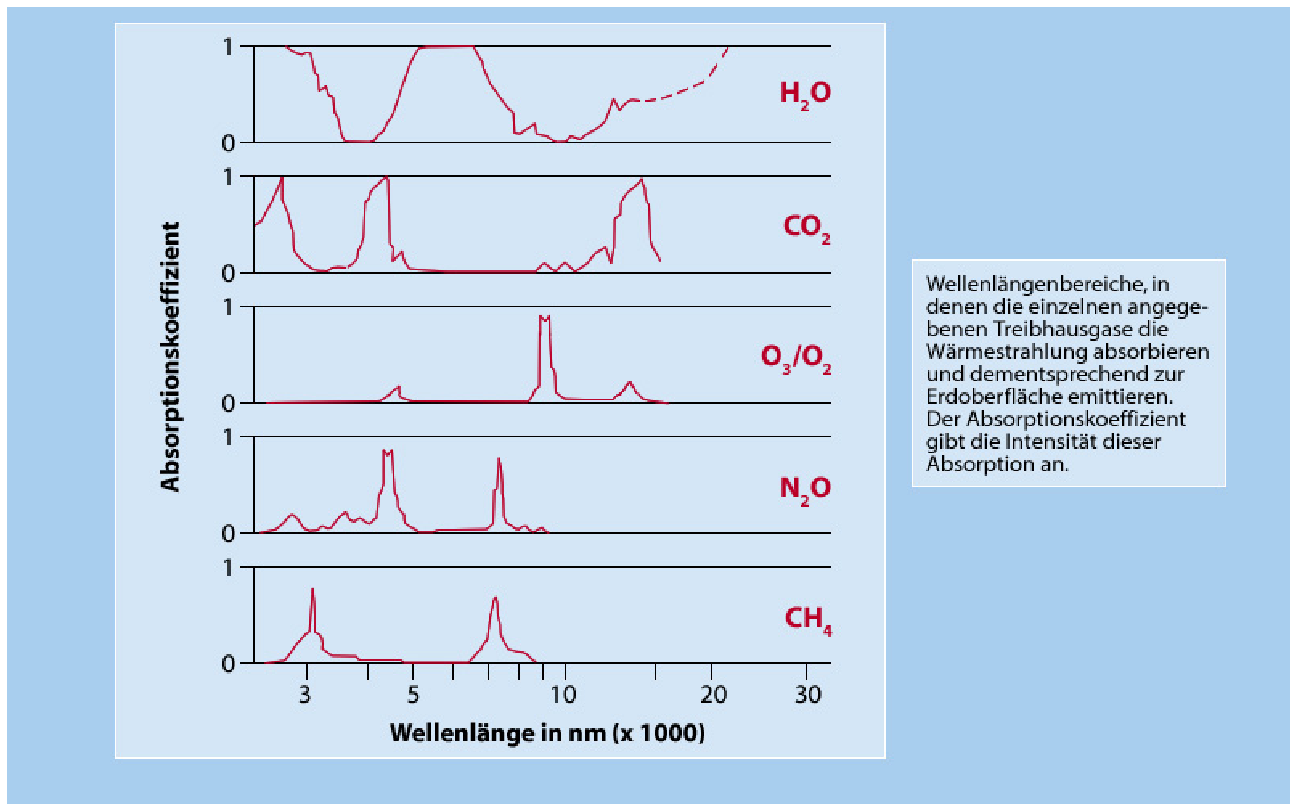


Abbildung 13: Absorption der Wärmerückstrahlung der Erdoberfläche durch atmosphärische Gase (nach SCHÖNWIESE und DIEKMANN 1989).

Der anthropogene Treibhauseffekt

Seit Beginn des Industriezeitalters hat der Mensch die Konzentration der natürlichen Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid, Methan, Distickstoffoxid (Lachgas) und Ozon erhöht und z. B. mit den FCKW (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) neue Treibhausgase hinzugefügt. Diese Spurengase haben eine Wirkung auf den natürlichen Treibhauseffekt (s. Abb. 13), die man als anthropogenen Treibhauseffekt bezeichnet. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich exemplarisch auf das Kohlenstoffdioxid.

Die fossilen Energieträger (Erdgas, Erdöl und Kohle) nehmen unter natürlichen Bedingungen zumindest kurz- und mittelfristig nicht am Kohlenstoffkreislauf teil. Sie gelten deshalb als Kohlenstoffsenke. Mit Beginn der Industrialisierung wurden seit ca. 1750 immer größere Energiemengen benötigt. Dieser Energiebedarf wird bis heute überwiegend durch Förderung und Verbrennung fossiler Energieträger gedeckt. Der Großteil der geförderten fossilen Brennstoffe wird zur Produktion von Kraftstoffen und Strom genutzt. Darüber hinaus werden seit Mitte des 20. Jahrhunderts zahlreiche Produkte wie z. B. Farben, Lösemittel, Kunststoffe, Arzneistoffe etc. auf Erdölbasis hergestellt, die bei der (Müll-) Verbrennung ebenfalls teilweise zu CO_2 umgesetzt werden.

Insgesamt lagen die Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger in den 1980er Jahren bei 5,46 Gt C, in den 1990er Jahren bei 6,3 Gt C pro Jahr (Gt C = Gigatonnen Kohlenstoff, 1 Gt C = 1 Milliarde t

Kohlenstoff => 3,7 Milliarden t CO_2). Der durchschnittliche Anstieg seit den 1980er Jahren beträgt 0,4 % pro Jahr.

Anthropogen freigesetzter Kohlenstoff stammt aber nicht nur aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe, sondern auch aus Änderungen der Landnutzung. Bei der Rodung von Wäldern durch die landwirtschaftliche Nutzung wird in der Regel ein Großteil des in der Vegetation gespeicherten Kohlenstoffs zu CO_2 verbrannt. Ein anderer Teil entsteht durch die sich anschließende verstärkte Bodenerosion, durch die der im Boden gespeicherte Kohlenstoff durch Oxidation in die Atmosphäre gelangt. In den 1980er Jahren wurden durch veränderte Landnutzung 1,7 Gt C frei. Für die 1990er Jahre gibt es keinen gesicherten Wert (IPCC 2001). Auch das globale Bevölkerungswachstum trägt durch Verstärkung der Industrialisierung und der Entwaldung sowie den damit verbundenen Verlust von Kohlenstoffsenken zum globalen CO_2-Anstieg bei.

Der gesamte Eintrag vom anthropogenen in die Atmosphäre eingetragenem Kohlenstoff liegt gegenwärtig bei 7 - 8 Gt Kohlenstoff pro Jahr. Messungen zeigen, dass der atmosphärische Kohlenstoffgehalt aber nur um 3,2 Gt Kohlenstoff pro Jahr zunimmt. Daraus ergibt sich die Frage, wo der Rest verbleibt. Das atmosphärische CO_2 wird recht schnell im Ozean und in den Ökosystemen am Land gebunden. Der Grad der Fähigkeit des Ozeans und der Ökosysteme, auf dem Land als CO_2-Senke zu wirken, bestimmt die Höhe der Absorption der zunehmenden Kohlenstoffdioxid-Emissionen in der Atmosphäre und die Richtung der Netto-Austauschflüsse. So nahmen Ozean und Landvegetation in den 1990er Jahren 1,7 bzw. 1,4 Gt Kohlenstoff pro Jahr mehr Kohlenstoff aus der Atmosphäre auf, als sie an die Atmosphäre abgaben, und reduzierten damit die Zunahme des atmosphärischen CO_2-Gehalts durch anthropogene Emissionen um ungefähr die Hälfte.

3 Didaktische Informationen

Im folgenden Kapitel finden Sie Informationen, die Sie für einen fächerverbindenden oder fachübergreifenden Unterricht im Modul „Physik und Chemie der Atmosphäre“ mit dem Schwerpunkt Treibhauseffekt im Rahmen des Konzeptes „System Erde“ benötigen.

2.3 Lernziele

In der aktuellen Klimadiskussion spielt der Treibhauseffekt eine große Rolle. In dieser Diskussion geht es hauptsächlich um eine drohende globale Erwärmung und die damit verbundenen Gefahren für die Menschen. Dass es ohne den natürlichen Treibhauseffekt jedoch kein menschliches Leben auf der Erde geben würde, wird dabei oft vernachlässigt und soll den Schüler/innen im Rahmen dieses Moduls vermittelt werden.

Die Lernenden sollen dabei insbesondere erkennen, dass

- die breiten- und jahreszeitenabhängige Einstrahlung der Sonne im Zusammenspiel mit verschiedenen Faktoren zwar das Klima auf der Erde bestimmt, nicht aber die gesamte einfallende Strahlung auch tatsächlich von der Erde absorbiert wird, sondern ein Teil der Strahlung vom Wasser der Ozeane, den Wolken und den Oberflächen der Kontinente reflektiert wird;
- die Atmosphäre eine große Bedeutung als schützende Gashülle für die Erde gegen schädliche Komponenten der Sonneneinstrahlung hat;
- physikalisch-chemische Abläufe in der Atmosphäre den Treibhauseffekt steuern;

- es zum Verständnis des Treibhauseffektes der Berücksichtigung grundlegender Prinzipien der atmosphärischen Strahlungsphysik und Wärmehaushaltslehre bedarf (Absorption von Wärmestrahlung, Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase, Abstrahlung von Wärme durch einen Körper);
- das Verständnis für die physikalischen Zusammenhänge des Treibhauseffektes in der Atmosphäre mittels Durchführung einfacher Experimente mit Modelltreibhäusern geschult werden kann;
- die möglichen Folgen des Treibhauseffektes somit besser erklärt und beurteilt werden können.

2.4 Hinweise zu den Lernvoraussetzungen

Das vorliegende Modul kann in unterschiedlichem Umfang und auf unterschiedlichem Niveau eingesetzt werden. Bei der einfachsten Umsetzung des Moduls reichen als Lernvoraussetzung grundlegende Kenntnisse des Energiebegriffs, die in der Sekundarstufe I vermittelt werden, und Alltagsvorstellungen über Gleichgewichtszustände.

2.5 Hinweise zu horizontalen und vertikalen Verknüpfungen

Notwendiges Basiswissen liefert das Modul „System Erde – Die Grundlagen“.

In Abhängigkeit von der Struktur des geplanten Unterrichts ist eine mögliche Einbettung des Moduls Treibhauseffekt in eine ausführliche Behandlung klimatischer Prozesse denkbar. So kann zudem der Bezug zur aktuellen Klimadiskussion hergestellt werden und das Modul könnte eine Grundlage für die Diskussion der erforderlichen politischen Entscheidungen zum Klimaschutz bieten.

Da in diesem Modul nur am Rande auf den globalen Kohlenstoffkreislauf eingegangen wird, ist es zur Behandlung dieses Themas sinnvoll, entsprechende Bausteine aus dem Modul „Kohlenstoffkreislauf“ im Rahmen des Einsatzes dieses Moduls zu behandeln.

Im Anschluss an dieses Modul könnten verschiedene Klimamodelle und die darauf basierenden Klimaprognosen behandelt werden, die sehr stark auf der Annahme des Anstiegs von atmosphärischem Kohlenstoffdioxid basieren. In der Vergangenheit wurden diese Modelle immer mehr verfeinert - z. T. aber auch stark korrigiert – und es erscheint daher sinnvoll, die Problematik von Prognosemodellen zu diskutieren. Hierzu findet sich Näheres im Modul „Klimasystem und Klimageschichte“. (Abschnitt „Szenarien und Prognosen“)

2.6 Erläuterungen und Nutzungshinweise zu den Materialien

Das Modul „Physik und Chemie der Atmosphäre“ bietet vier Bausteine an.

Im **Baustein 1 „Wärmehaushalt“** (Material 1) soll das Thema eingeleitet und in einen größeren Zusammenhang eingeordnet werden. Der Treibhauseffekt wird als ein Klimafaktor des Klimasystems Erde dargestellt und seine Bedeutung für das Leben auf der Erde betont. Dabei sollen astrophysikalische und terrestrische Klimafaktoren erwähnt und auf die Bedeutung von Rückkopplungsprozessen hingewiesen werden.

Weiter wird in diesem Baustein auf die Energiebilanz der Erde eingegangen. Es soll verdeutlicht werden, dass auf der Erde ein energetisches Fließgleichgewicht herrscht, da unser Planet einerseits ständig Energie von der Sonne empfängt und sich dadurch aufheizt, andererseits aber auch ständig Energie abgibt. Das sich einstellende Temperaturgleichgewicht beruht auf einer ausgeglichenen Energiebilanz. Das bei der



Behandlung des Treibhauseffekts nötige Denken in Energiebilanzen kann hier am einfachen Schülerexperiment geübt werden.

Nach der grundlegenden Betrachtung von Energieflüssen stellt sich in **Baustein 2 „Temperaturstrahlung“** (Material 1) die Frage nach der konkreten Art des Energietransports zur Erde hin bzw. von der Erde weg. Dabei wird herausgearbeitet, dass der Energietransport nur in Form von elektromagnetischer Strahlung erfolgen kann und dass sich sichtbares Licht, UV- und Wärmestrahlen nur durch ihre Wellenlängen bzw. die Frequenzen voneinander unterscheiden. Am Beispiel eines glühenden Drahtes wird gezeigt, wie sich Spektren von Körpern unterschiedlicher Temperatur unterscheiden. Die von den Schülern und Schülerinnen selbst aufgenommenen Strahlungskurven führen zur PLANCK’schen Strahlungskurve eines schwarzen Strahlers.

Im **Baustein 3 „Strahlungsabsorption“** (Material 1) wird die Bedeutung von Kohlenstoffdioxid für das Treibhaus Erde behandelt. In einem einfachen Experiment wird gezeigt, dass Wasser(dampf) und Kohlenstoffdioxid Wärmestrahlung absorbieren und so bewirken, dass die Atmosphäre (in einem bestimmten Wellenlängenbereich) für die von der Erde abgegebene Wärmestrahlung undurchlässig ist. Diese Ergebnisse werden auf die Strahlungsemission der Erde und auf die Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase hin interpretiert. In der vorliegenden Einheit wird auf die Herkunft und den Verbleib des Kohlenstoffdioxids nur am Rande eingegangen. Eine weitergehende Behandlung des Themas könnte mit Unterrichtsmaterial aus dem Modul „Kohlenstoffkreislauf“ durchgeführt werden.

Im **Baustein 4 „Modelltreibhäuser“** (Material 1) soll die grundsätzliche Wirkungsweise eines einfachen Modelltreibhauses aus Glas verdeutlicht werden. Am Beispiel dieses Treibhauses wird die Frage behandelt, wie sich die Durchlässigkeit von Glas für Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge auf die Temperatur im Treibhausinneren auswirkt. Dies führt dann zu der Frage, wie durchlässig die Atmosphäre für Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge ist und wie der Strahlungshaushalt der Erde aussieht.

4 Vorschläge für den Unterrichtsverlauf

Baustein 1: Material 2 „Klimazonen“ dient als Einstieg in die Thematik. Es sollen wichtige Voraussetzungen zum Verständnis der klimatischen Verhältnisse auf der Erde geklärt werden. Dies kann z. B. durch eine Internetrecherche geschehen (Zeit: 45 Minuten). Im Material 3 „Wärmehaushalt der Erde - Temperaturentwicklung in einem bestrahlten Körper“ geht es um den Energiehaushalt eines Treibhauses (z. B. „Treibhaus“ Erdatmosphäre). Hierzu sollen Simulationsexperimente an einem einfachen Modelltreibhaus geplant und im Unterricht durchgeführt werden (Zeit: 90 Minuten).

Baustein 2: Material 2 „Erste Energiebilanz“ und Material 3 „Modell eines Temperaturstrahlers“ dienen zur Verdeutlichung der Temperaturstrahlung zur Erde (90 Minuten). Die Schülerergebnisse können in Form von Schülerpräsentationen oder auch im Unterrichtsgespräch geklärt werden.

Baustein 3: Das Material 2 „Absorption von Wärmestrahlung“ zeigt die Absorption von Wärmestrahlung durch Wasser und CO_2. Hierzu werden wiederum Experimente im Unterricht durchgeführt (Zeit: 90 Minuten). Material 3 „Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase (Strahlungsemission der Erde)“ dient der Interpretation der Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase. Im Rahmen dieser Unterrichtsstunde können auch vermutliche Auswirkungen des Anstiegs der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre diskutiert werden (Zeit: 45 Minuten).

Im **Baustein 4**: Material 2 „Ein einfaches Modelltreibhaus aus Glas“ und Material 3 „Modelltreibhaus mit CO_2“ wird auf die Wirkung von Glastreibhäusern eingegangen (Zeit: 90 Minuten). Sollte neben der

Versuchsvorrichtung aus Baustein 1 (Modul 2, Baustein 1, Material 3) ein Glastreibhaus zur Verfügung stehen, könnten die Versuche auch in themendifferenzierter Gruppenarbeit parallel bearbeitet werden. Der Vergleich der zwei verschiedenen Modelle könnte anschließend von den Schülern und Schülerinnen präsentiert werden. Material 4 „Der natürliche Treibhauseffekt“ fasst noch einmal den natürlichen Treibhauseffekt in Form einer Schülerinformation zusammen. Den Abschluss des Bausteins und somit der gesamten Unterrichtseinheit bildet das Material 5 „Strahlungshaushalt des Systems Erde – Die Atmosphäre“. Das Informationsblatt (für besonders interessierte und leistungsstarke Lerngruppen) erarbeitet den Strahlungshaushalt des Systems Erde noch einmal in mehreren detaillierten Modellschritten (Zeit: 90 Minuten).

5 Literatur

CUBASCH, U. und KASANG, D. (2000): Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes, Gotha, Stuttgart

FRANKENBERG, P. (1989): Sonnenstrahlung, Lufthülle und Klima. In: Praxis Geographie, Jg. 19 Heft 6, S. 6

GASSMANN, F. (1994): Was ist los mit dem Treibhaus Erde. SGU Schweizerische Gesellschaft für Umweltschutz Zürich; Verlag der Fachvereine an den schweizerischen Hochschulen (vdf) und B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig.

IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of the Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, J.T. et al., eds), Cambridge and New York 2001

MM-PHYSIK-UNI-WÜRZBURG: WWW.SCHULPHYSIK.DE; MM-Physik-Uni-Würzburg; MM-Physik-Würzburg-Online

NISBET, E.G. (1994): Globale Umweltveränderungen. Spektrum Verlag, Berlin

RIEDEL, E. (1989): Anorganische Chemie. de Gruyter Verlag, Berlin

SCHÖNWIESE, C.-D. und DIEKMANN, B. (1989): Der Treibhauseffekt. Rororo

WATSON, A.J. und LOVELOCK, J.E. (1983): Biological Homeostasis of the Global Environment: The Parable of Daisy-world, Tellus, 35B, 284-289

WEISCHET, W. (1988): Einführung in die allgemeine Klimatologie – Physikalische und meteorologische Grundlagen. B. G. Teubner, Stuttgart

6 Unterrichtsmaterialien

Baustein 1: Wärmehaushalt

 Material 1: Wärmehaushalt (Information)

 Material 2: Klimazonen (Arbeitsbogen)

 Material 3: Wärmehaushalt der Erde - Planung und Durchführung eines Simulationsexperimentes (Arbeitsbogen)

 Material 4: Wärmehaushalt der Erde – Durchführung eines Demonstrationsexperimentes (Arbeitsbogen)

Baustein 2: Temperaturstrahlung

 Material 1: Temperaturstrahlung (Information)

 Material 2: Erste Energiebilanz (Arbeitsbogen)

 Material 3: Modell eines Temperaturstrahlers (Arbeitsbogen)

Baustein 3: Strahlungsabsorption

 Material 1: Absorption von Wärmestrahlung (Information)

 Material 2: Absorption von Wärmestrahlung (Arbeitsbogen)

 Material 3: Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase (Strahlungsemission der Erde) (Arbeitsbogen)

Baustein 4: Modelltreibhäuser

 Material 1: Modelltreibhäuser (Information)

 Material 2: Ein einfaches Modelltreibhaus aus Glas (Arbeitsbogen)

 Material 3: Modelltreibhaus mit CO_2 (Arbeitsbogen)

 Material 4: Der natürliche Treibhauseffekt (Information)

 Material 5: Strahlungshaushalt des Systems Erde – Die Atmosphäre (Information)

Baustein 1: Wärmehaushalt

Klimafaktoren

❶ Erde aus dem All

Die Abbildung 1 zeigt eine von der NASA stammende Satelliten-Aufnahme der Erde. Der afrikanische Kontinent ist deutlich zu erkennen, während die Antarktis unter einer dichten Wolkendecke verborgen ist.

Bei einer Reise von Nord nach Süd würde man alle Klimazonen der Erde durchqueren. Bliebe man an einem Ort, so würde man im Verlauf eines Jahres einen (mehr oder weniger stark ausgeprägten) Wechsel der Jahreszeiten erleben.



Abbildung 1: Satellitenbild der Erde.

❷ Klimafaktoren:

Klimaänderungen können sich sowohl durch die Wechselwirkungen zwischen den Subsystemen des Klimasystems (Atmosphäre, Hydrosphäre, Lithosphäre, Biosphäre) und auch zwischen einzelnen Komponenten der Subsysteme ergeben (interne Variabilitäten), als auch durch externe, von außen auf das Klimasystem einwirkende Antriebsfaktoren bedingt sein (s. Abb. 1).

Zu den externen Klimaantriebsfaktoren werden Sonneneinstrahlung, Erdbahnparameter oder auch Vulkanausbrüche gezählt. Die anthropogene Wirkung auf das Klima wird in der Wissenschaft ebenfalls als externer Einfluss verstanden, obwohl der Mensch Bestandteil der Biosphäre ist.. Bei externen Einflüssen

wirkt eine Klimaänderung in der Regel nicht auf die Verursacher dieser Einflüsse zurück. Das gilt mit Sicherheit für die Sonne und im Wesentlichen auch für den Vulkanismus, nicht aber für den Menschen.

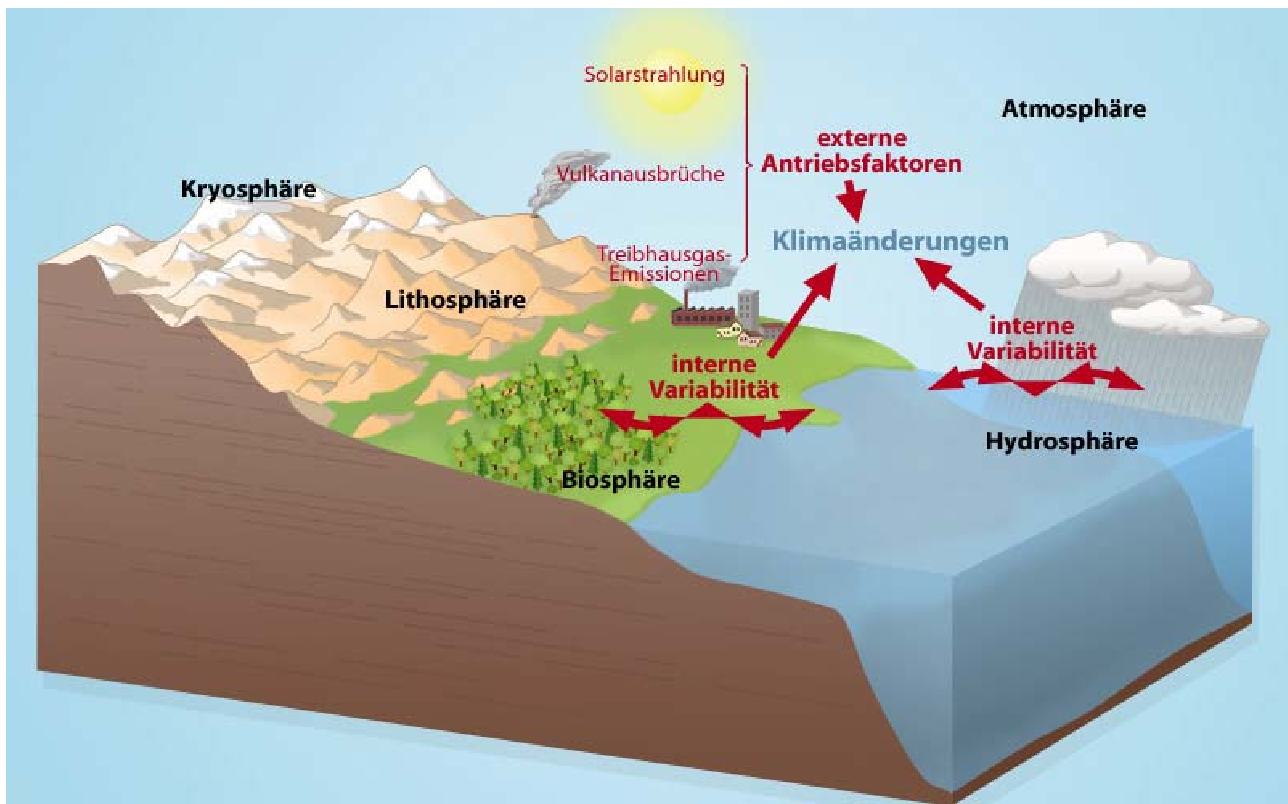


Abbildung 1: Externe Antriebsfaktoren und interne Variabilität von Klimaänderungen (nach KASANG 2002).

Das Klima der Erde wird im Wesentlichen von der einfallenden Sonnenstrahlung bestimmt. Diese ist in erster Linie abhängig von der Entfernung der Erde zur Sonne. Die Neigung der Erdachse aus der vertikalen Stellung (ca. 23,5°) - d. h. die Winkelstellung der Erdachse zur der Ebene der Erdumlaufbahn (Schiefe der Ekliptik) - führt z. B. zur Entstehung der Jahreszeiten. Periodisch auftretende Änderungen bei der Bewegung der Erde um die Sonne (wie z. B. die Änderung der Umlaufbahn) führen zu Änderungen bei der Sonneneinstrahlung auf die Erde und bewirken somit Klimaänderungen. (Die im Erdinneren durch radioaktiven Zerfall entstehende Wärme wird bei energetischen Betrachtungen zum Strahlungshaushalt der Erde vernachlässigt).

Nicht die gesamte einfallende Strahlung der Sonne wird tatsächlich von der Erde absorbiert, ein Teil der Strahlung wird auch reflektiert (Albedo). Das Wasser der Ozeane und die Oberflächen der Kontinente reflektieren die Sonnenstrahlung unterschiedlich stark. Die Reflexion durch die Festlandsmassen hängt wiederum von deren Oberflächenbeschaffenheit ab – Schnee und Eis reflektieren z. B. viel stärker als Wälder oder dunkle Ackerflächen.

Die einfallende Sonnenstrahlung initiiert in der Atmosphäre, in den Ozeanen und auf den Kontinenten eine große Zahl an Prozessen. Über vielfältige Mechanismen sind diese Prozesse miteinander gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig. In ihrer Gesamtheit bilden sie das globale Klimasystem. U. a. treibt die Energie der Sonnenstrahlung die atmosphärischen und die ozeanischen Strömungen an. Die Verteilung von Land- und Wassermassen hat Einfluss auf die atmosphärische und die ozeanische Zirkulation. Beide

Zirkulationssysteme sorgen zu etwa gleichen Teilen für eine Verteilung der eingestrahlten Wärme und prägen auf diese Weise das Klima (interne Variabilität).

Für das Verständnis von Klimaänderungen stellen die verschiedenen Zeitskalen, auf denen sich die Veränderungen vollziehen, ein großes Problem dar. Am schnellsten ändern sich die Phänomene in der Atmosphäre. Wichtige Vorgänge wie etwa der Wechsel von Hoch- und Tiefdruckgebieten in den mittleren Breiten erfolgen in wenigen Tagen, Wolkenkonstellationen wandeln sich sogar in Stunden oder Minuten. Im Ozean ist die in Zeiträumen von Wochen bis Monaten reagierende Deckschicht von der Tiefsee zu unterscheiden, in der die typischen Vorgänge Jahrzehnte bis mehrere Jahrhunderte dauern.

Die oberen 50 - 100 m des Ozeans sind unmittelbar an die Vorgänge in der Atmosphäre gekoppelt. Deshalb können hier Temperatur, Salzgehalt und Strömungen in recht kurzen Zeiträumen ihren Zustand ändern. Veränderungen in der Tiefsee hingegen laufen weitgehend getrennt von den Vorgängen in der Deckschicht ab und erfolgen wegen der Beteiligung großer Wassermassen nur sehr langsam. Noch längere Zeiträume benötigen die Bildung und das Abschmelzen großer Eisschilde, wie sie sich heute auf Grönland und der Antarktis finden, die es jedoch in der letzten Kaltzeit auch in Nordeuropa und Nordamerika gab. Die Zeitdauer dieser Veränderungen erstreckt sich über einige 10.000 Jahre und mehr.

In der aktuellen Klimadiskussion spielt der anthropogene Treibhauseffekt eine große Rolle. In dieser Diskussion geht es hauptsächlich um die drohende globale Erwärmung und die damit verbundenen Gefahren für die Menschen. Dass es ohne den natürlichen Treibhauseffekt kein menschliches Leben auf der Erde gäbe, wird dabei oft vernachlässigt.

Die Atmosphäre wirkt wie ein schützendes Treibhaus für die Erde. Ohne die Atmosphäre würde auf der Erdoberfläche eine mittlere Temperatur von –18 °C herrschen. Es gäbe es kein flüssiges Wasser und somit keine Lebensgrundlage für Pflanzen, Tiere und Menschen.

Seit Beginn der Industrialisierung steigt aufgrund der Verbrennung fossiler Energieträger der Kohlenstoffdioxidgehalt der Atmosphäre ständig an. Der dadurch mit bewirkte anthropogene Treibhauseffekt verstärkt den natürlichen Treibhauseffekt derart, dass das schützende Treibhaus zum „Brutkasten“ zu werden droht.

❷ Aufgaben:

1) Was versteht man unter Klima und wie kann man diesen Begriff gegen die Begriffe Wetter und Witterung abgrenzen?

2) Welche Haupt-Klimazonen kennen Sie? Wo befinden sich diese Zonen?

3) Erklären Sie, wie es zur Ausbildung der verschiedenen Klimazonen und der Jahreszeiten kommt.

4) Das Klima der Erde hat sich in der Vergangenheit geändert und wird sich auch in der Zukunft ändern. Welche möglichen Ursachen für Klimaänderungen kennen Sie? Begründen Sie Ihre Antwort.

Baustein 1: Wärmehaushalt

Temperaturentwicklung in einem bestrahlten Körper

❶ Einleitung: Ein einfaches Treibhaus

Die Erde erhält von der Sonne ständig Energie in Form von Strahlung (s. Abb. 1). Trotzdem heizt sich die Erde nicht stetig weiter auf, sondern behält eine konstante Durchschnittstemperatur, die bei ca. 15 °C liegt. Wie lässt sich diese Tatsache erklären?

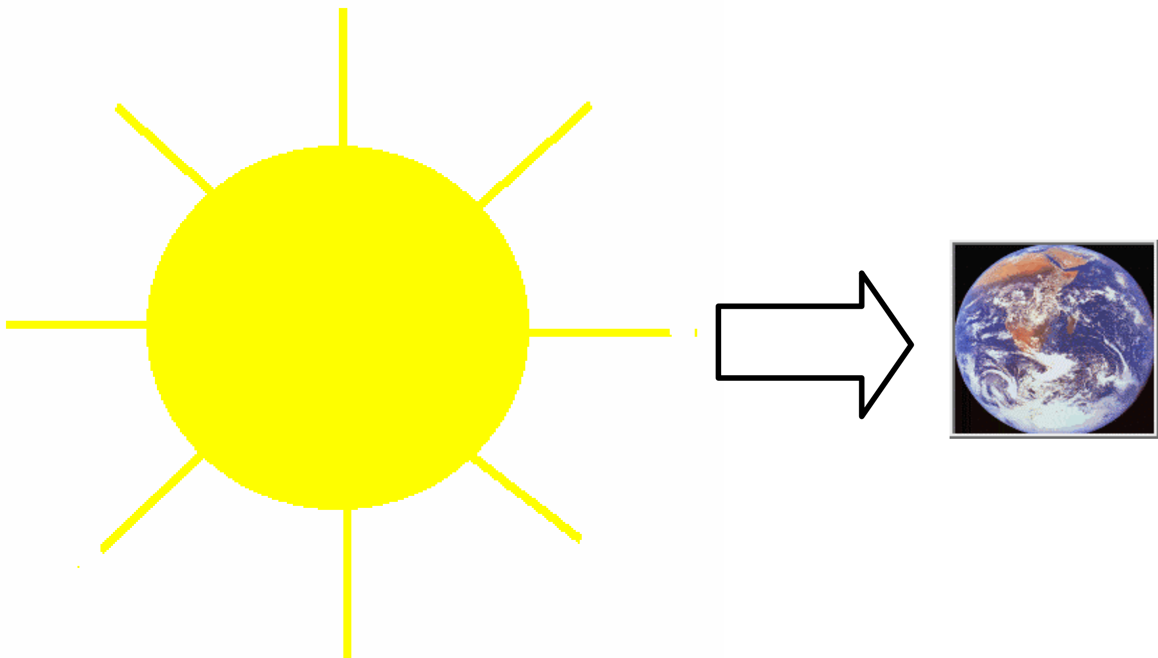


Abbildung 1: Sonnenstrahlung in Richtung Erde.

❷ Materialien:

- Thermometer
- Lampe (ca. 75W)
- Becherglas (1l)
- schwarze Pappe
- Alufolie
- Frischhaltefolie (PE)

❸ **Durchführung:**

I. Bauen Sie den Versuch gemäß der Skizze auf (s. Abb. 2) und verschließen Sie das Becherglas mit PE-Folie.

II. Beleuchten Sie das Treibhaus mit einer Lampe und messen Sie den Temperaturanstieg. Notieren Sie Ihre Ergebnisse!

III. Schalten Sie die Lampe nach Beendigung des Experiments aus und messen Sie den Temperaturabfall.

IV. Wiederholen Sie die Messungen mit einer Lage Alu-Folie an Stelle der schwarzen Pappe.

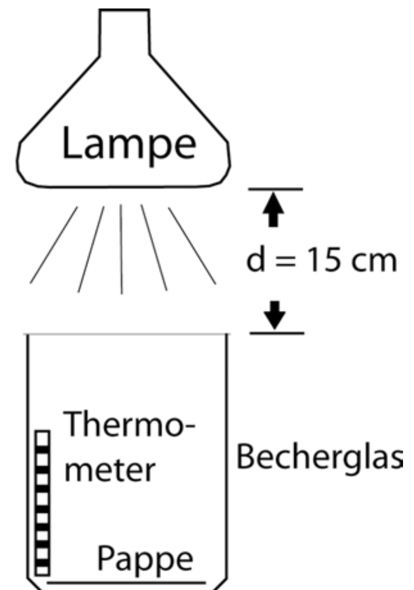


Abbildung 2: Versuchsaufbau zum Wärmehaushalt der Erde.

❹ Aufgaben:

1) Erläutern Sie die Versuchsanordnung. Welche Funktion haben die einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus?

2) Beschreiben Sie die Durchführung und interpretieren Sie das Ergebnis.

3) Diskutieren Sie die Grenzen des Modells!

4) Werten Sie die Ergebnisse ihres Experimentes tabellarisch aus.

5) Werten Sie die Ergebnisse ihres Experimentes graphisch aus.

6) Diskutieren Sie das Versuchsergebnis im Hinblick auf die ursprüngliche Fragestellung! Der Erde wird von der Sonne ständig Energie in Form von Strahlung (Wärmestrahlung, sichtbares Licht, UV) zugeführt. Warum heizt sie sich dabei nicht stetig weiter auf?

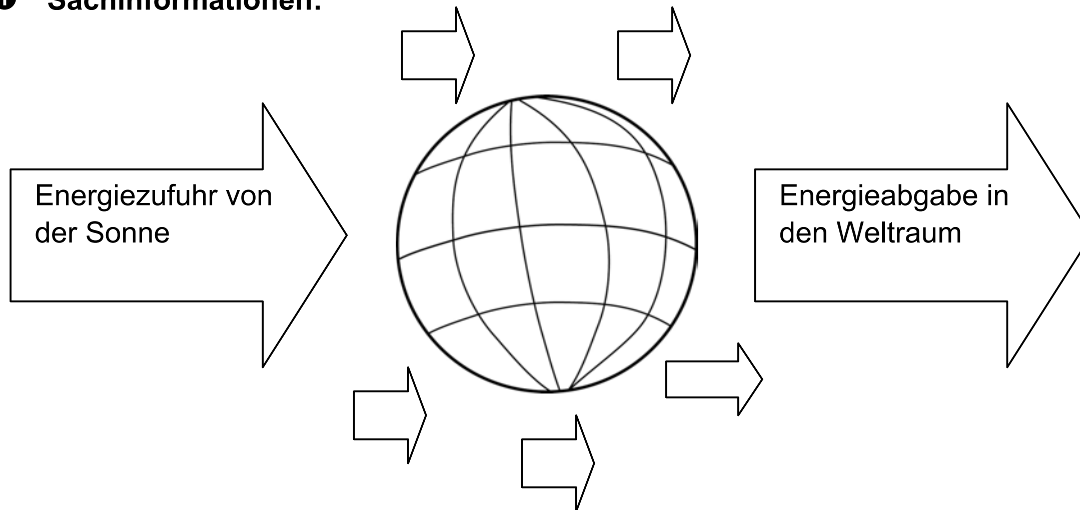
ERWÄRMUNG	Pappe	Alu
Zeit **t** in min	Temperatur **T** in °C	Temperatur **T** in °C
0		
0,5		
1		
1,5		
2		
2,5		
3		
3,5		
4		
4,5		
5		
5,5		
6		
6,5		
7		
7,5		
8		
8,5		
9		
9,5		
10		
10,5		
11		
11,5		
12		
12,5		
13		
13,5		
14		
14,5		
15		

ABKÜHLUNG	Pappe	Alu
Zeit **t** in min	Temperatur **T** in °C	Temperatur **T** in °C
0		
0,5		
1		
1,5		
2		
2,5		
3		
3,5		
4		
4,5		
5		
5,5		
6		
6,5		
7		
7,5		
8		
8,5		
9		
9,5		
10		
10,5		
11		
11,5		
12		
12,5		
13		
13,5		
14		
14,5		
15		

Baustein 2: Temperaturstrahlung

Erste Energiebilanz

❶ **Sachinformationen:**



- Die Erde erhält von der Sonne Energie;
- Die Erde gibt Energie in den Weltraum ab;
- Beides geschieht in Form von **Strahlung**;
- Die Sonne ist heiß und strahlt (z. T.) im **sichtbaren Bereich** des Spektrums ab;
- Die Erde ist viel kälter als die Sonne und strahlt **nicht im sichtbaren Bereich** ab; sie gibt langwellige **Wärmestrahlung** ab.

❷ **Aufgabe:**

1) Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Temperatur eines strahlenden Körpers und der von ihm abgegebenen Strahlung?

Baustein 2: Temperaturstrahlung

Modell eines Temperaturstrahlers

❶ **Materialien:**

- Draht, zwei Isolierklemmen
- stufenlos einstellbare Spannungsquelle
- Prisma
- Stativmaterial

❷ **Versuchsaufbau:**

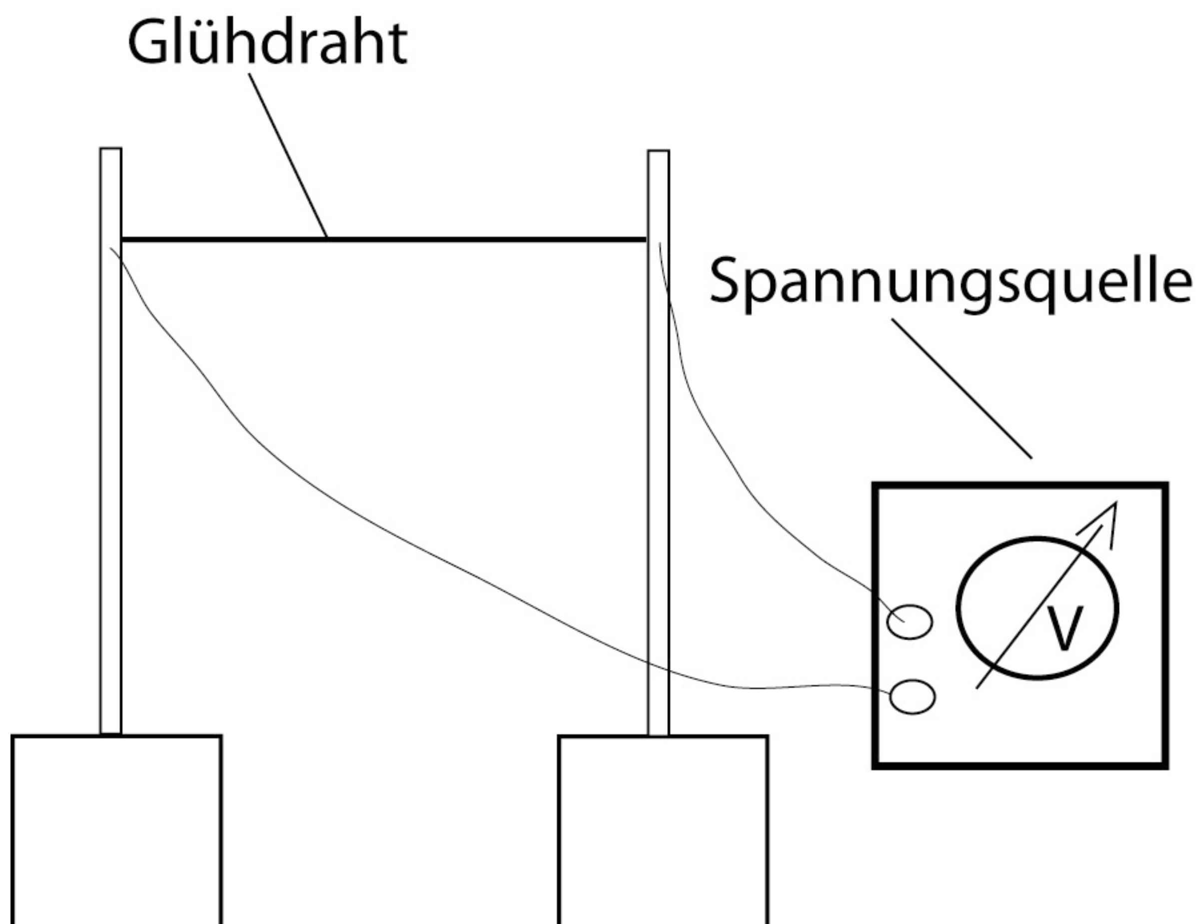


Abbildung 1: Schematisierter Versuchsaufbau eines Temperaturstrahlers.

❸ Durchführung:

I. Bauen Sie den Versuch entsprechend der Vorgaben auf

II. Erhöhen Sie Spannung U und Stromstärke I stetig weiter

III. Bearbeiten Sie u. a. Aufgaben

❹ Aufgaben:

1) Was beobachtet man mit bloßem Auge am Draht, wenn man die Spannung U und damit die Stromstärke I immer weiter erhöht? Wie ändert sich dabei die Temperatur des Drahts?

2) Was beobachtet man, wenn man den glühenden Draht durch ein Prisma betrachtet? Führen Sie diesen Arbeitsschritt bei verschiedenen Temperaturen des Glühdrahts durch.

3) Halten Sie Ihre Beobachtungen in Form eines Diagramms fest. Tragen Sie in dem Achsenkreuz (jeweils für eine Temperatur) auf, wie "leuchtstark" eine bestimmte Spektralfarbe vertreten ist. Das Maß für die "Leuchtstärke" der Farbe resultiert aus der persönlichen Empfindung.

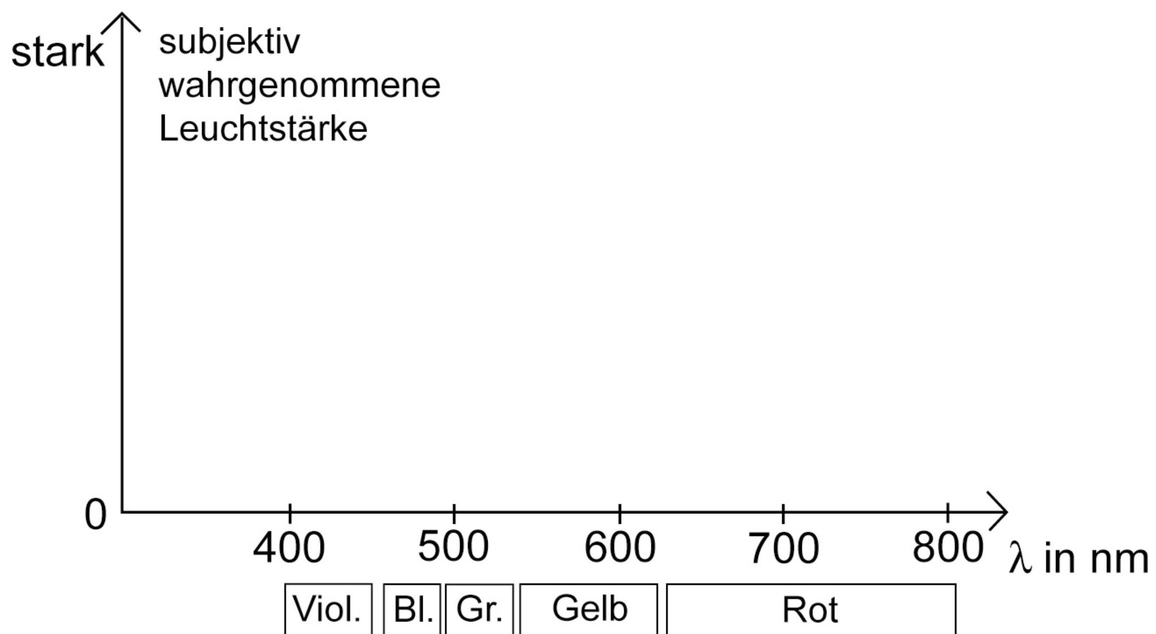


Abbildung 2: Abbildung zur Darstellung der Spektralfarben -Leuchtstärke eines erhitzten Glühdrahtes.

4) Vergleichen Sie Ihre individuellen Diagramme mit Abbildung 3.

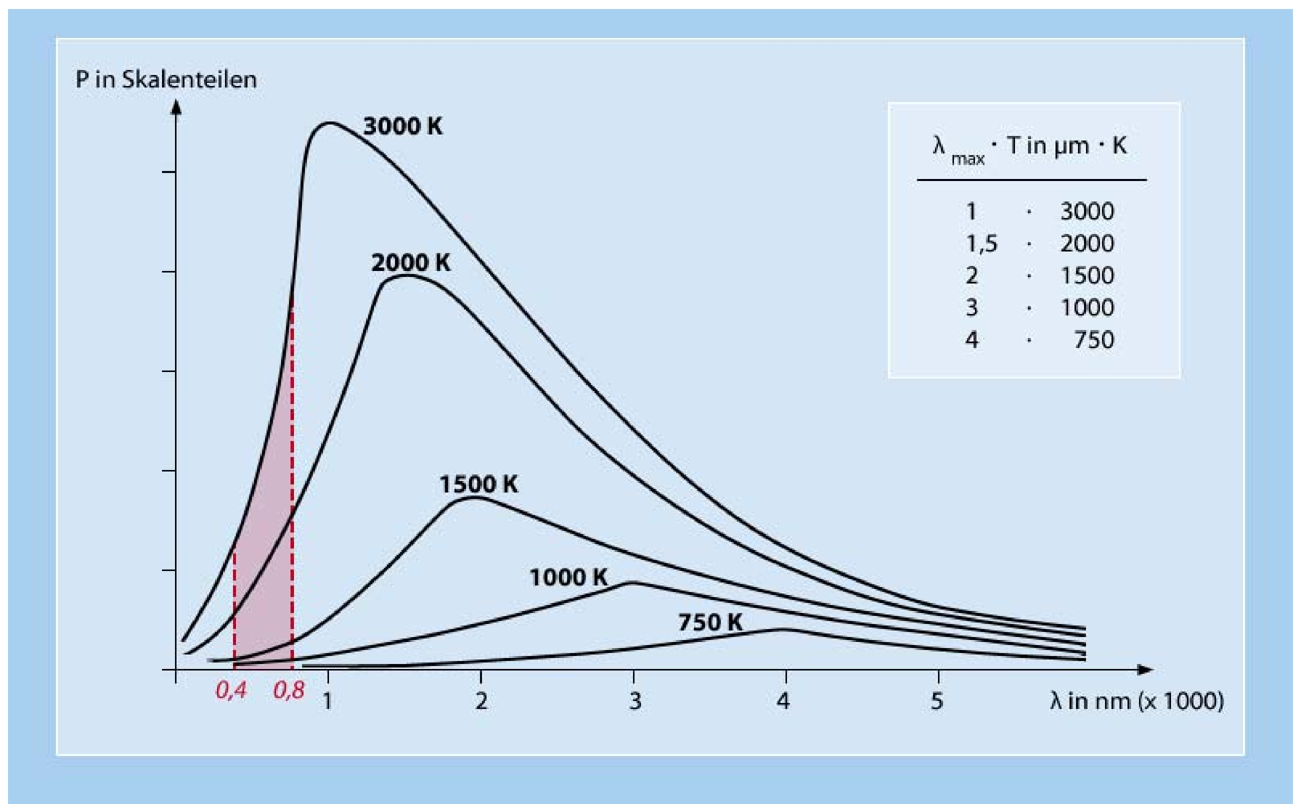


Abbildung 3: Schematisierte PLANCK'sche Strahlungskurven.

Baustein 3: Strahlungsabsorption

Absorption von Wärmestrahlung

❶ Materialien:

- Reflektor (Pappscheibe mit Aluminiumfolie)
- Weißblechdosen
- Temperaturdetektor mit Messgerät
- Bunsenbrenner
- Hebebühne
- Testmaterialien (Frischhaltefolie; dicke PE-Folie, Gefrierbeutel; Leitungswasser; Glasscheibe; schwarze Pappe; Alufolie)
- Kohlenstoffdioxid, Luft

❷ Versuchsaufbau:

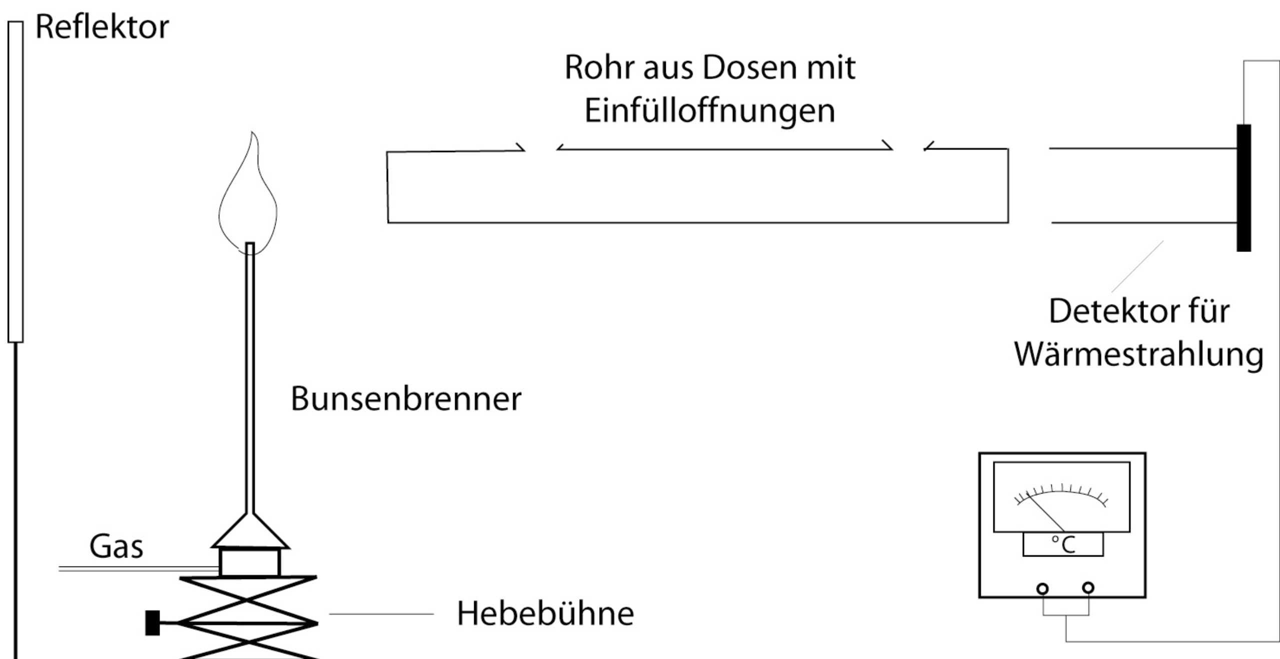


Abbildung 1: Schematisierter Versuchsaufbau zur Messung der Wärmedurchlässigkeit verschiedener Stoffe. Das Rohr mit Einfüllöffnungen dient nur zur Untersuchung von Gasen.



❸ Durchführung:

I. Bauen Sie entsprechend der Skizze eine Anordnung zur Messung der Wärmedurchlässigkeit verschiedener Stoffe auf.

II. Machen Sie sich die Funktion der einzelnen Versuchselemente klar.

III. Arbeiten Sie bei der Versuchsdurchführung bitte zunächst so lange ohne Testmaterial, bis sich die Temperatur am Detektor stabilisiert hat (Testmessungen durchführen!). Bringen Sie anschließend nacheinander die Testmaterialien zwischen Wärmequelle und Detektor.

IV. Untersuchen Sie die Wärmedurchlässigkeit

a) einer dünnen Frischhaltefolie

b) einer dickeren PE-Folie (Gefrierbeutel)

c) einer etwa 1 cm dicken Wasserschicht (in einem Kunststoffbeutel)

d) einer Glasscheibe

e) einer schwarzen Pappe und

f) einer Alufolie.

Halten Sie diese Materialien nacheinander zwischen Bunsenbrenner und Detektor halten und messen Sie jeweils nach 1 oder 2 Minuten die Temperatur am Detektor. Vor jedem Versuch ist dabei auf die Temperaturkonstanz am Detektor zu achten.

V. Untersuchen Sie die Wärmedurchlässigkeit

a) von Luft und

b) von Kohlenstoffdioxid,

indem Sie das gasgefüllte (Luft, CO_2) Rohr, welches an beiden Enden mit PE-Folie verschlossen wurde, zwischen Bunsenbrenner und Detektor halten (siehe Abb.) und nach 1 oder 2 Minuten die Temperatur am Detektor messen. Nach der Messung mit Luft leiten Sie über eine der Öffnungen Kohlenstoffdioxid in das Rohr und wiederholen die Messung nach Verschließen der beiden Einfüllöffnungen.

❹ Aufgaben:

1) Was beobachten Sie? Notieren Sie!

2) Besonderes zum Absorptionsverhalten von Wasser: Füllen Sie Wasser in einen Gefrierbeutel. An diesem Beutel werden auf beiden Seiten kurze Stativstangen befestigt, um eine allzu starke Ausbeulung des Beutels zu verhindern. Dann muss der mit Wasser gefüllte Beutel (Wasserschicht ca. 1 cm mächtig) zwischen Wärmequelle und Detektor gebracht werden. Was beobachten Sie? Stellen Sie eine Fehlerbetrachtung unter Berücksichtigung der Foliendicke des Beutels an!

3) Besonderes zum Absorptionsverhaltens von Kohlendioxid: Füllen Sie CO_2 in die lange, beidseitig offene Blechröhre, deren Öffnungen mit Frischhaltefolie abgedichtet sind, und durchstrahlen dann die CO_2-gefüllte Dose mit Wärme.

4) Beschreiben Sie die Versuchsdurchführung, notieren Sie Ihre Beobachtungen und Messdaten und erläutern Sie die Ergebnisse Ihrer Untersuchungen.

Baustein 3: Strahlungsabsorption
Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase (Strahlungsemission der Erde)

❶ Materialien:

Zur Lösung der aufgaben werden die Versuchsergebnisse von Material 2 sowie Abbildung 1 benötigt

- Die Kurven der Abbildung zeigen die im Labor gemessenen Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase.
- Die Kurven wären bei der üblichen Darstellung mit linearer Achseneinteilung sehr breit und flach (vgl. Strahlungskurven); das Maximum wäre schlecht zu sehen.
- Aus diesem Grund wird durch die Verwendung eines logarithmischen Maßstabs dieses Darstellungsproblem vermieden.

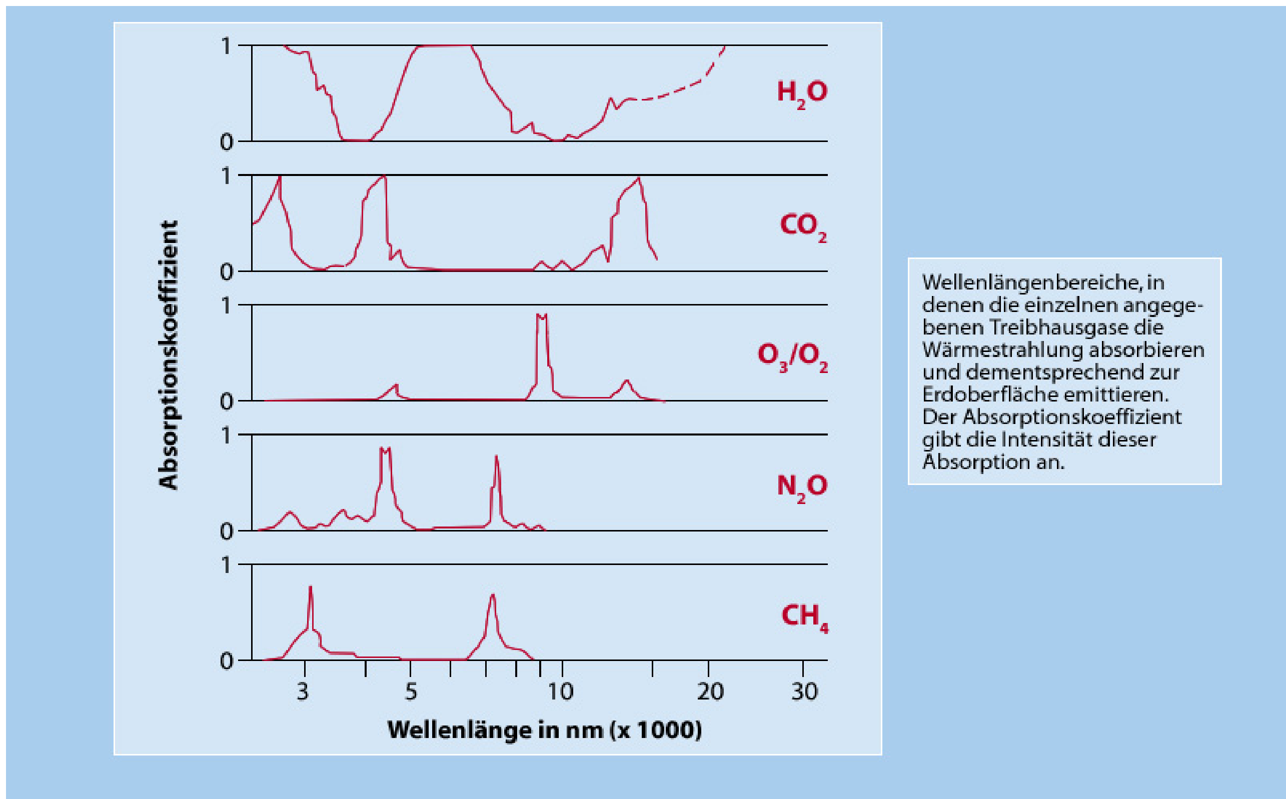


Abbildung 1: Absorptionsspektren verschiedener Treibhausgase.

❷ Aufgaben:

1) Bei welchen Wellenlängen absorbieren die verschiedenen Treibhausgase Wärmestrahlung? Bei welchen Wellenlängen ist die Absorption jeweils am stärksten und am schwächsten?

2) Aus Fachbüchern kann entnommen werden, dass durch Kohlenstoffdioxid (CO_2) das „Wasserdampffenster“ im Absorptionsspektrum geschlossen wird. Erklären Sie diese Aussage mit Hilfe der in der Abbildung dargestellten Absorptionskurven.

Baustein 4: Modelltreibhäuser

Ein einfaches Modelltreibhaus aus Glas

❶ Treibhauseffekt:

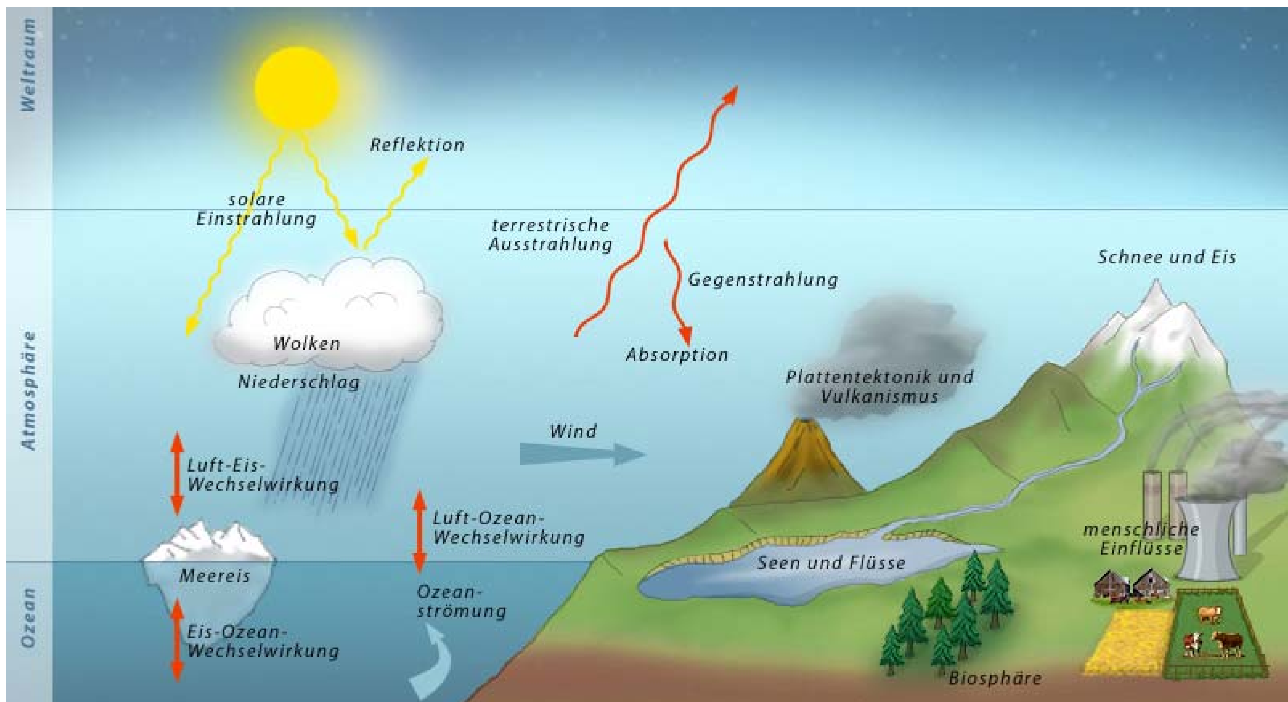


Abbildung 1: Das Klimasystem. Schematisierte Faktoren des natürlichen Treibhauseffektes sind die Einstrahlung der Sonne, die Rückstrahlung der Erdoberfläche und die Gegenstrahlung der unteren Atmosphäre (Wolken, CO_2).

Der Treibhauseffekt beruht im Wesentlichen darauf, dass die Atmosphäre für die einfallende kurzwellige Sonnenstrahlung eine andere Durchlässigkeit besitzt als für die von der Erde ausgehende langwellige Wärmestrahlung. Die Atmosphäre wirkt für die Erde wie die Glasabdeckung in einem Treibhaus.

Die grundsätzliche Wirkungsweise des Treibhauses Erde wird am Modell eines Glastreibhauses deutlich. Glas ist für das sichtbare Licht durchlässig. Ultra-violettes Licht (UV) hingegen kann Glas nur in geringem Maße passieren. Aus diesem Grund bekommt man hinter einer Glasscheibe selbst bei intensiver Sonneneinwirkung keinen Sonnenbrand.

❷ Aufgaben:

1) Erklären Sie mit Hilfe der Durchlässigkeitskurve von Glas (Abbildung 2) die Wirkungsweise eines Glastreibhauses. Benutzen Sie dabei auch die Planck'schen Strahlungskurven (Abbildung 3).

2) Konstruieren Sie die Absorptionskurve von Glas. Benutzen Sie hierfür die Vorlage Abbildung 4.

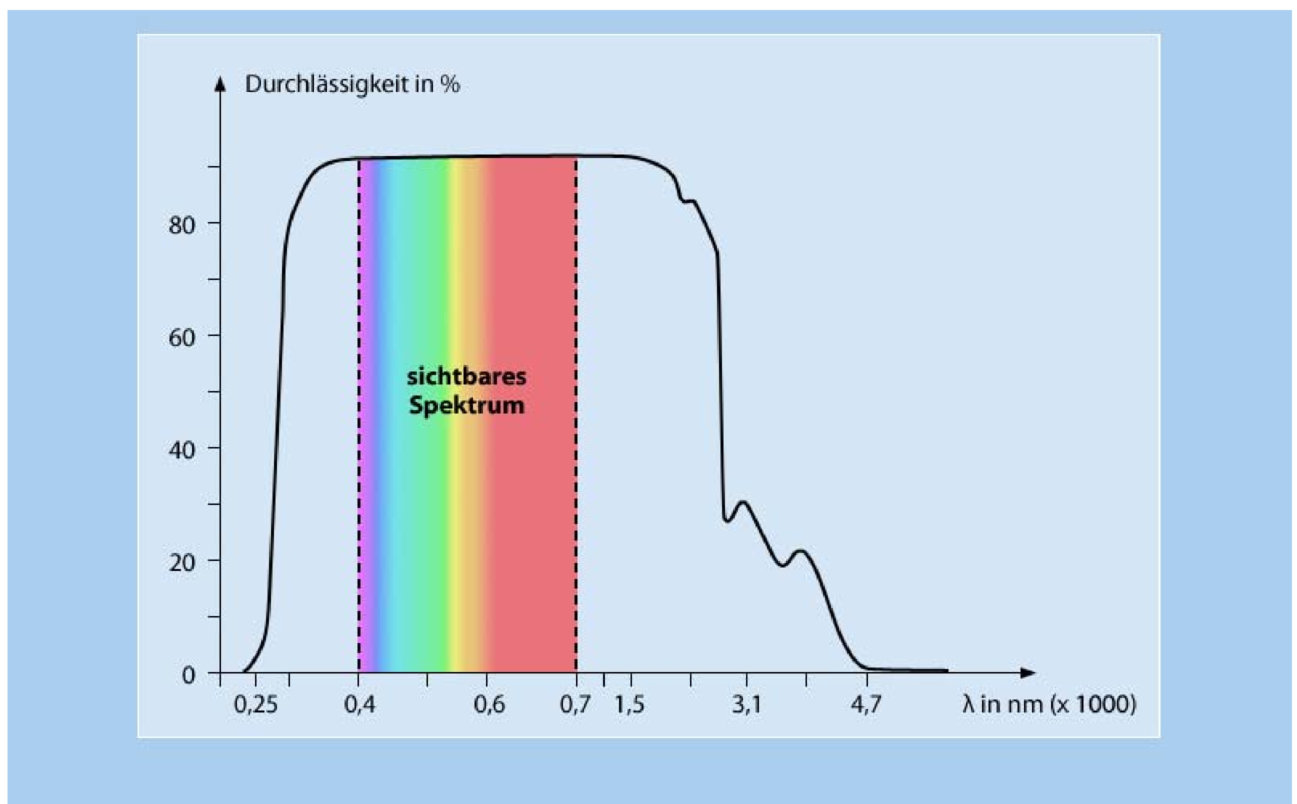


Abbildung 2: Wellenlängenabhängige Durchlässigkeit (in Prozent) von Glas für Strahlung verschiedener Wellenlänge gemessen in % der Strahlungsleistung nach dem Passieren des Glases (nach: Physik, Westermann).

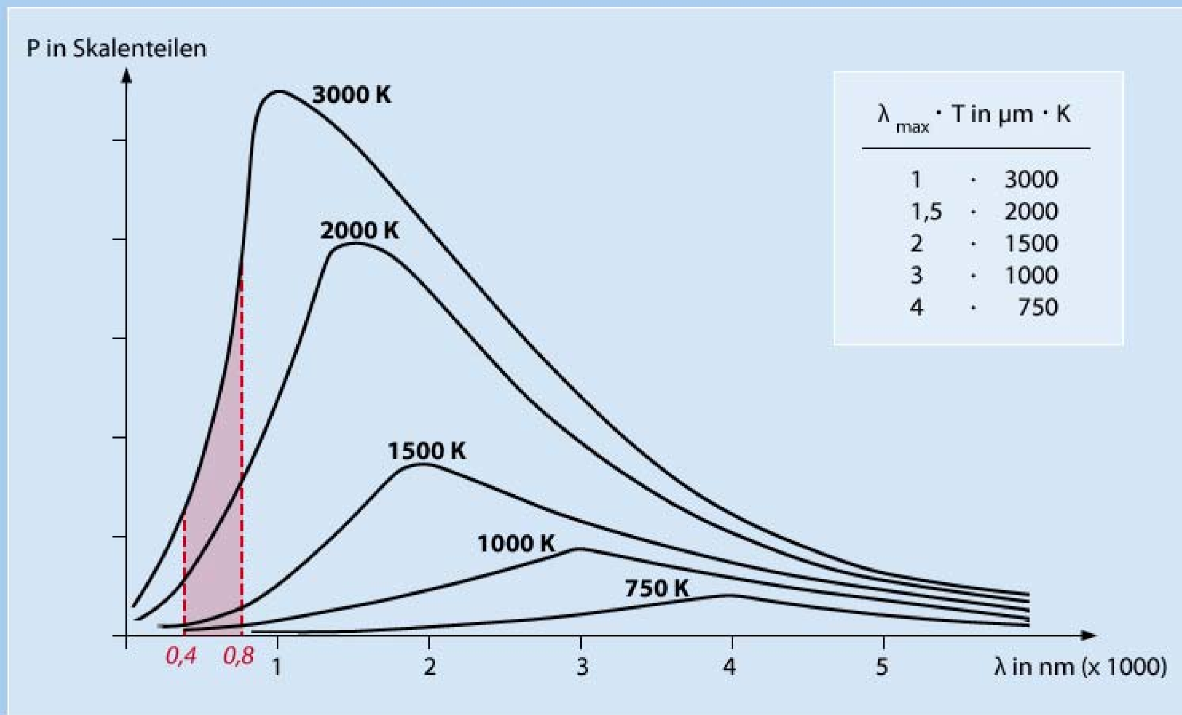


Abbildung 3: Planck'sche Strahlungskurven.

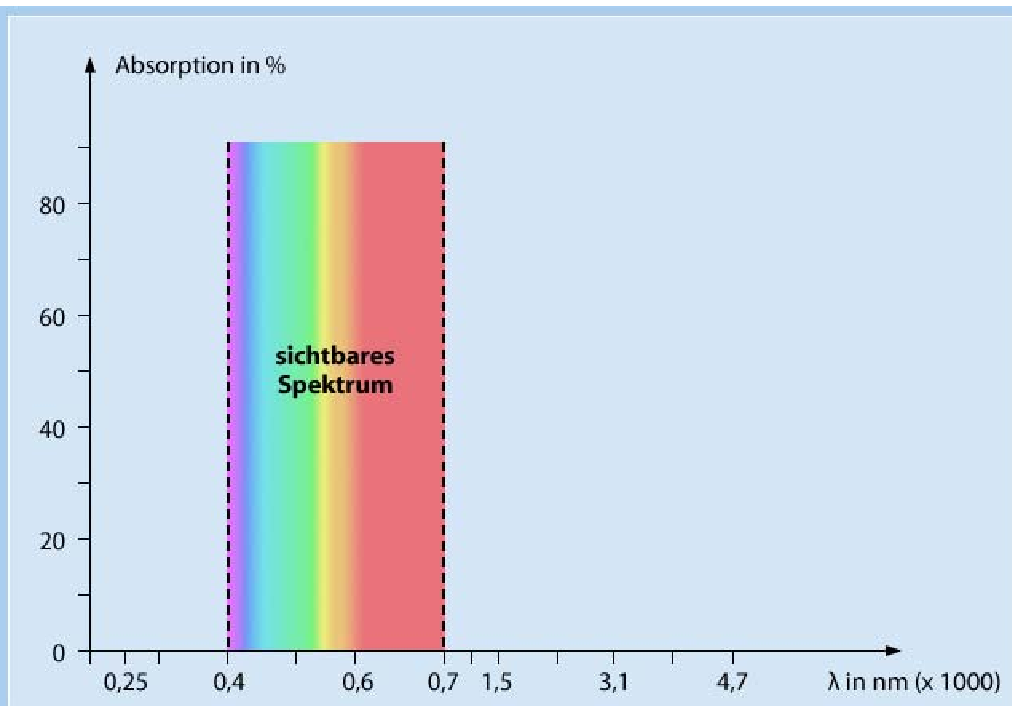


Abbildung 4: Wellenlängen-abhängige Absorption (von Glas) der Strahlungsleistung (in Prozent; Vorlage zum Eintragen der Kurve der Absorption von Strahlung verschiedener Wellenlänge durch Glas. Die Absorptioon wird gemessen in % der Strahlungsleistung nach dem Passieren des Lichts (nach: Physik, Westermann).

Baustein 4: Modelltreibhäuser

Modelltreibhaus mit CO_2

❶ Materialien:

- Temperaturmessfühler
- Lampe (120 W)
- Becken und Behälter aus Polyethylen
- Wasser
- Klarsichtfolie / PE-Folie
- Styroporflocken
- Pappe
- Alufolie
- Digitalthermometer
- CO_2-Gas

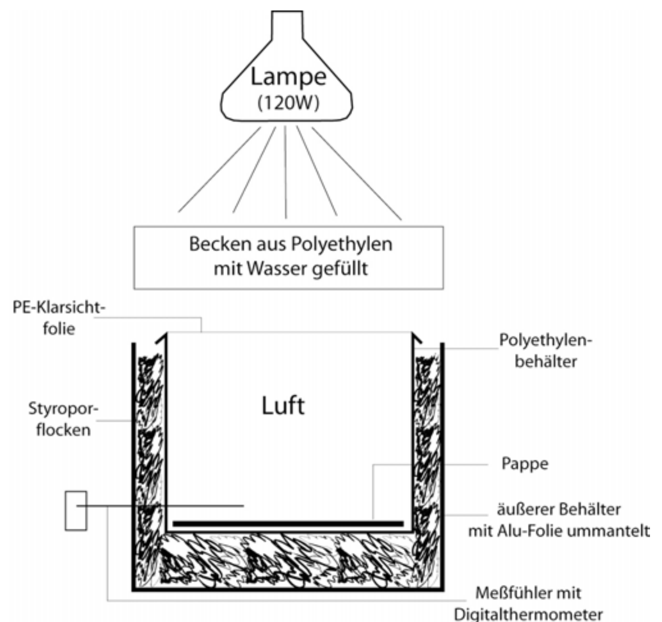


Abbildung 1: Versuchsaufbau zum Modelltreibhaus.

❷ Durchführung:

I. Bauen Sie ein Modelltreibhaus gemäß der Skizze (s. Abb. 1) auf.

II. Bestrahlen Sie das luftgefüllte Modelltreibhaus etwa 5 Minuten, notieren Sie Anfangs- und Endtemperatur.

III. Lassen Sie das Modelltreibhaus abkühlen, bis die Anfangstemperatur wieder erreicht ist. Füllen Sie es nun mit CO_2 an Stelle von Luft, dichten Sie es wieder ab und bestrahlen Sie es genauso lange wie bei Punkt II.

IV. Notieren Sie die die Anfangs- und Endtemperatur.

❹ Aufgaben und Auswertung:

1) Fertigen Sie ein Protokoll des Experiments an. Beschreiben Sie darin auch die Funktion der einzelnen Teile der Experimentieranordnung.

2) Welche Bedeutung hat das Versuchsergebnis für das Klima auf der Erde?

Baustein 4: Modelltreibhäuser

Der natürliche Treibhauseffekt

Die Atmosphäre wird sowohl durch die von der von Sonne und als auch durch die von der Erdoberfläche ausgehende Strahlung erwärmt. Die Wärme resultiert aus einer verstärkten Schwingung von Molekülen. Dies soll im Folgenden näher erläutert werden.

Bei der Umwandlung von solarer Strahlung in Wärmestrahlung wird das Schwingungsniveau bestimmter Moleküle (Wasser (H_2O), Kohlenstoffdioxid- (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid (Lachgas, N_2O) erhöht. Da diese Form der Absorption von Strahlungsenergie nur bei Molekülen mit polarisierten Bindungen möglich ist, können z. B. die Hauptbestandteile der Atmosphäre – Stickstoff und Sauerstoff – nicht direkt erwärmt werden. Die angeregten o. g. Moleküle können aber ihre Bewegungsenergie auf Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle übertragen, so dass es zu einer indirekten Erwärmung der Atmosphäre kommt.

Auch durch die Wärme-Ausstrahlung von der Erdoberfläche in die Atmosphäre wird das Schwingungsniveau der o. g. Moleküle erhöht. Diese geben wiederum einen Teil der Strahlung zur Erdoberfläche zurück, der andere Teil der Strahlung entweicht ins Weltall.

Insgesamt gelangt nur ein geringer Teil der langwelligen Wärme-Ausstrahlung von der Erdoberfläche *direkt* in den Weltraum, entweichen da die treibhauswirksamen Gase die Strahlung in unterschiedlichen, jeweils charakteristischen Wellenlängenbereichen absorbieren. Die größte Bedeutung für den natürlichen Treibhauseffekt hat der Wasserdampf. Der in Wolken gebundene Wasserdampf kann zweierlei Effekt haben: die oberen Wolkenschichten wirken abkühlend durch die Erhöhung der Reflexion solarer Strahlung, während die unteren Wolken den Wärmestau verstärken.

Kohlenstoffdioxid trägt zum natürlichen Treibhauseffekt zu etwa 22 % bei, ist in der Atmosphäre jedoch nur zu 0,03 % enthalten (370 ppm im Jahre 2002). Methan und Lachgas weisen mit einer Konzentration von ca. 1,8 ppm bzw. 0,3 ppm eine erheblich geringere atmosphärische Konzentration als Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid auf, jedoch ist ihre Fähigkeit zur Reflexion und Absorption von Wärmestrahlen pro Molekül wesentlich größer (relatives Treibhauspotential).

Reflexion und Absorption von terrestrischer Wärmestrahlung sowie die Übertragung der Wärme auf die übrige Atmosphäre durch Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas und andere Spurengase (Treibhauseffekt) sorgen für eine globalen Mitteltemperatur von ca. 15°C. Gegenüber einem Szenario von –18°C bei erhöhter Ausstrahlung ohne Treibhausgase bedeutet dies eine Erwärmung um 33°C aufgrund des natürlichen Treibhauseffektes. Diese Erwärmung betrifft jedoch lediglich die Troposphäre, in der sich die treibhauswirksamen Gase befinden und sich auch unser gesamtes Wetter- und Klimageschehen abspielt.